

Análise e Melhoria dos Processos Produtivos numa Linha de Produção de Aglomerados de Cortiça

Antero Bernardo Azevedo dos Santos

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Mário Amorim Lopes

Orientador na empresa: Eng.º António Espinhosa



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2017-07-24

À minha família.

Resumo

Nos dias de hoje, o sucesso de uma empresa passa essencialmente pela sua capacidade de adaptação constante à natureza dinâmica do mercado e às suas tendências. A concorrência e a exigência dos clientes, que procuram produtos entregues rapidamente, com qualidade, diversidade e baixo custo, são dois dos principais fatores que exigem proatividade e uma busca constante da excelência por parte das empresas que pretendam ser competitivas e bem sucedidas. É então fundamental adotar uma política de melhoria contínua dos processos produtivos, para que estes estejam aptos a dar uma resposta eficaz às imposições do mercado.

A presente dissertação foi realizada numa linha de laminagem de blocos de cortiça, com vista à análise e melhoria dos seus processos produtivos. Nesta linha, as previsões dos tempos de laminagem das encomendas estavam bastante distantes da realidade, o que condicionava fortemente o planeamento da produção. A produtividade também não se encontrava nos níveis desejados e a quantidade de tempos de paragem era um problema cuja análise se tornava impreterível.

Neste sentido, o principal foco da dissertação foi a criação de um modelo de previsão dos *lead times* de laminagem que permitisse melhorar a precisão das estimativas já existentes. Para além disso, fez-se uma série de observações e medições na linha, com vista à identificação, quantificação e caracterização dos tempos de paragem e apresentaram-se propostas de melhoria para a sua redução. Estas melhorias visaram, essencialmente, a alteração de *layouts* e modificações em equipamentos. Fez-se, também, uma quantificação do material desperdiçado na linha, resultante da operação das máquinas.

Com o modelo criado conseguiu-se uma redução de 53,92% do erro de previsão, passando este de 37,29% para 17,18%. Esta redução é bastante significativa e permitiu fiabilizar e adequar o planeamento da produção, dispondo agora a empresa de previsões mais realistas para os *lead times* que permitirão um maior compromisso para com o cliente e um aumento do nível de serviço. As restantes melhorias propostas irão permitir reduzir tempos de paragem, minimizar deslocações de operadores e organizar espaços.

Analysis and Improvement of the Productive Processes in a Production Line of Cork Agglomerates

Abstract

Nowadays, the success of a company is strongly bounded to its ability to be in permanent adaptation to the dynamic nature of the market and its trends. Competition and the requirements of costumers, who search for quick delivered products, with quality, diversity and low cost, are two of the main factors that demand proactivity and a constant search for excellence by the companies that intend to be competitive and sucessful. Therefore, it is essential to adopt a policy of continuous improvement of the productive processes, so that they are able to respond effectively to market constraints.

The present dissertation was carried out in a rolling line of cork blocks, directed to the analysis and improvement of its productive processes. In this line, the forecasts of the rolling times of the orders were far from reality, which strongly conditioned the production planning. Productivity was also not at the desired levels and the number of stopping times was a problem whose analysis became unavoidable.

To this end, the main focus of the dissertation was the creation of a predictive model for the rolling lead times that would allow the improvement of the accuracy of the existing forecasts. In addition, a series of observations and measurements were made on the line, in order to identify, quantify and characterize stopping times and improvement proposals were presented to reduce these unproductive times. These improvements consisted, essentially, on layout changes and modifications in equipment. A quantification of the wasted material in the line due to the machine's operation was also carried out.

The created model led to a reduction of 53,92% of the forecast error, that went from 37,29% to 17,18%. This reduction is quite significant and allowed production planning to be made more reliable and adequate, providing the company with more realistic forecasts for lead times that will allow a greater commitment with the customer and an increase of the service level. The remaining proposed improvements will allow the reduction of downtimes, minimize operator movements and organize areas.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à *Amorim Cork Composites* pela oportunidade proporcionada para a realização deste projeto, inserido no programa *Cork Potential*.

Em seguida, agradeço à Nanci Carvalho, principal responsável pela minha integração na empresa, por todo o cuidado e atenção ao longo deste período.

Agradeço, seguidamente, ao Engenheiro António Espinhosa por toda a orientação ao longo do projeto.

Ao meu orientador da faculdade, o Professor Mário Amorim Lopes, pela atenção, orientação, disponibilidade e prontidão na resposta às minhas questões.

Agradeço aos meus colegas e amigos, que também se encontravam a realizar a dissertação na empresa, pela boa disposição, entreaajuda e por tornarem tudo mais fácil.

À minha família, em particular aos meus pais, por estarem sempre ao meu lado e por serem os principais responsáveis por ser quem sou hoje.

À minha namorada, por estar sempre presente em todos os momentos, por toda a ajuda e por me encorajar constantemente para dar o meu melhor.

Por fim, aos meus amigos por me acompanharem ao longo deste percurso académico e o tornarem um período inesquecível.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do Projeto e Motivação	1
1.2	Grupo Amorim	1
1.3	Amorim Cork Composites	3
1.4	Objetivos do Projeto	4
1.5	Método Seguido no Projeto	4
1.6	Estrutura da Dissertação	5
2	Enquadramento Teórico	6
2.1	Métodos para Estimar o <i>Lead Time</i>	6
2.2	Análise Multivariada	9
2.2.1	Pressupostos de uma Análise Multivariada	10
2.3	O Princípio de Pareto e Análise ABC	11
2.4	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> (MAPE)	12
3	Caso de Estudo	13
3.1	Descrição da Linha	13
3.2	Descrição dos Produtos	15
3.3	Descrição do Processo Produtivo	16
3.4	Diagnóstico e Análise da Linha	18
4	Modelo de Previsão do <i>Lead Time</i> de Laminagem	29
4.1	Regressão Multivariada com 7 Variáveis Independentes	29
4.1.1	Introdução e Preparação dos Dados	30
4.1.2	Verificação dos Pressupostos e Realização da Regressão	31
4.1.3	Análise dos Resultados Obtidos	39
4.2	Regressão Multivariada com 2 Variáveis Independentes	41
4.2.1	Análise dos Resultados Obtidos	42
4.3	Modelo em Excel	43
4.3.1	Apresentação e Explicação do Modelo	43
4.3.2	Resultados Obtidos	46
5	Melhorias Adicionais	47
5.1	Alteração do manipulador de colocação de blocos na mesa	47
5.2	Calibração do tempo de atuação do empurrador de blocos à saída da retificadora	48
5.3	Novo <i>Layout</i> do Armazém de Blocos	49
5.4	Colocação de um sensor na retificadora para medir a altura dos blocos	51
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	52
6.1	Conclusões	52
6.2	Perspetivas de Trabalho Futuro	53
	Referências	54
	ANEXO A: Tabela de Correlações da Regressão Multivariada com 6 Variáveis Independentes	56
	ANEXO B: Instruções para utilização do Modelo de Previsão do <i>Lead Time</i> de Laminagem	57
	ANEXO C: Planta do Armazém de Blocos e Respetivas Dimensões	60
	ANEXO D: <i>Layout</i> Proposto para o Armazém de Blocos	61
	ANEXO E: Normas do Novo <i>Layout</i> do Armazém de Blocos	62

Siglas

ACC – *Amorim Cork Composites*

BNR – Blocos Não Retificados

BPR – Blocos Parcialmente Retificados

BTR – Blocos Totalmente Retificados

CBR – *Case Based Reasoning*

CNM – *Cork Natural Materials*

IA – Inteligência Artificial

LT – *Lead Time*

MAPE – *Mean Absolute Percentage Error*

OEE – *Overall Equipment Effectiveness*

pp – Pontos percentuais

Tc – Tempo de Ciclo

TPS – *Toyota Production System*

UN – Unidade de Negócio

WIP – *Work In Progress*

Índice de Figuras

Figura 1 - Presença mundial da Corticeira Amorim	2
Figura 2 - Unidades de negócio do Grupo Amorim	2
Figura 3 - Evolução das vendas do Grupo Amorim de 2014 para 2015	3
Figura 4 - Organigrama da área de operações da empresa	3
Figura 5 - Métodos para estimar o lead time (Mourtzis et al. 2014)	7
Figura 6 - Derivação de curvas operacionais logísticas (Nyhuis et al. 2005).....	8
Figura 7 - Desequilíbrio entre <i>inputs</i> e <i>outputs</i> (Koch 2011)	11
Figura 8 - Planta da linha	13
Figura 9 - Retificadora	14
Figura 10 - Laminadora: mesa com blocos (esquerda) e cabeçote (direita)	14
Figura 11 - Placas de cortiça em palete	15
Figura 12 - Dimensões dos blocos de cortiça	15
Figura 13 - Fluxograma da linha	16
Figura 14 - Etapas de <i>setup</i> das laminadoras	18
Figura 15 - Diagrama de Pareto relativo às referências produzidas em 2016	18
Figura 16 - Cabeçalho da tabela de registo de tempos improdutivos	19
Figura 17 - Diagrama de Pareto relativo aos motivos de paragem da linha	21
Figura 18 - Cabeçalho da tabela de registo de tempos de ciclo	23
Figura 19 - Cartão de laminagem	23
Figura 20 - Caixa de nivelamento da laminadora 001	24
Figura 21 - Cabeçalho da tabela de cálculo do desperdício operacional pelo volume	26
Figura 22 - Esquema representativo da paragem dos blocos na entrada da retificadora	27
Figura 23 - Blocos retificados em palete	27
Figura 24 - Empurrador de blocos para a palete	28
Figura 25 - Desarrumação (esquerda) e várias referências na mesma fila (direita)	28
Figura 26 - Principais etapas da elaboração do modelo de previsão do <i>lead time</i> de laminagem	29
Figura 27 - Classificação das variáveis no <i>software</i> SPSS.....	30
Figura 28 - Folha de visualização de dados no SPSS	31
Figura 29 - Variáveis auxiliares criadas	32
Figura 30 - Teste de Durbin-Watson	33
Figura 31 - Exemplos de relações lineares (LaerdStatistics 2015)	33
Figura 32 - Regressão parcial entre o tempo de ciclo e a espessura	34
Figura 33 - <i>Scatterplot</i> dos resíduos <i>studentizados</i> e valores previstos não padronizados	34
Figura 34 - Estatísticas de colinearidade	35

Figura 35 - Dados ordenados por ordem decrescente de SDR_1	36
Figura 36 - Dados ordenados por ordem decrescente de LEV_1	36
Figura 37 - Dados ordenados por ordem decrescente de COO_1	36
Figura 38 - Histograma de resíduos padronizados	37
Figura 39 - <i>Plot</i> P-P normal de regressão de resíduos padronizados	38
Figura 40 - <i>Scatterplot</i> dos resíduos <i>studentizados</i> e valores previstos não padronizados após eliminação dos <i>outliers</i>	39
Figura 41 - Quadro resumo da regressão	40
Figura 42 - Tabela ANOVA	40
Figura 43 - Tabela de coeficientes	41
Figura 44 - Quadro resumo da nova regressão	42
Figura 45 - Tabela Anova da nova regressão	42
Figura 46 - Tabela de coeficientes da nova regressão	43
Figura 47 - Configuração do modelo de previsão do <i>lead time</i> de laminagem.....	44
Figura 48 - Colunas com cálculos intermédios do modelo de previsão do <i>lead time</i> de laminagem.....	44
Figura 49 - Constantes utilizadas no modelo de previsão do <i>lead time</i> de laminagem	45
Figura 50 - Comparação das previsões do modelo com as previsões já existentes e com os tempos reais	46
Figura 51 - Sistema atual (esquerda) e sistema proposto (direita).....	47
Figura 52 - Sistema testado	48
Figura 53 - Blocos retificados em palete: antes (esquerda) e depois (direita) da calibração do tempo de atuação do empurrador	49
Figura 54 - Dimensões atribuídas às filas	49
Figura 55 - Novo <i>layout</i> para o armazém de blocos	50
Figura 56 - Sensor proposto (esquerda) e esquema de funcionamento (direita)	51

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Cronograma	4
Tabela 2 - Dados recolhidos relativos às paragens das laminadoras	20
Tabela 3 - Média de paragens por laminadora	20
Tabela 4 - Tempos médios de limpezas de blocos	22

1 Introdução

1.1 Enquadramento do Projeto e Motivação

A presente dissertação em ambiente empresarial foi realizada numa empresa do ramo corticeiro, a *Amorim Cork Composites*, e teve por base a análise e melhoria dos processos produtivos numa linha de laminagem de aglomerados de cortiça.

Neste setor da fábrica, a produtividade não se encontrava nos níveis pretendidos e os tempos de paragem representavam uma percentagem bastante elevada no total de tempo diário de trabalho. Na maioria das vezes, a estimativa do tempo necessário para produzir cada encomenda estava bastante distante da realidade, o que condicionava fortemente o planeamento da produção. Tudo isto levava a que houvesse uma grande variabilidade no processo e margem para melhoria.

Este projeto surgiu no sentido de ir ao encontro destas necessidades, tendo como principal motivação a melhoria das previsões dos *lead times* dos vários produtos produzidos na linha. Com esta melhoria, pretendia-se adequar e fiabilizar o planeamento da produção, de forma a maximizar as potencialidades da linha e assim conduzir a um aumento do nível de serviço. Adicionalmente, a identificação e redução dos tempos de paragem e quantificação do material desperdiçado na operação das máquinas foram outros aspetos que serviram de motivação ao projeto, nos quais se pretendia também atuar.

1.2 Grupo Amorim

Com a sua origem em 1870, o Grupo Amorim é uma das maiores multinacionais portuguesas e há 147 anos é líder a nível mundial no ramo da cortiça. Desde os anos 60, o grupo iniciou o seu processo de internacionalização, tendo neste momento 83 empresas espalhadas por todo o mundo (ver Figura 1), 3.500 colaboradores, 22.000 clientes e um volume de negócios anual de 605.000.000€.

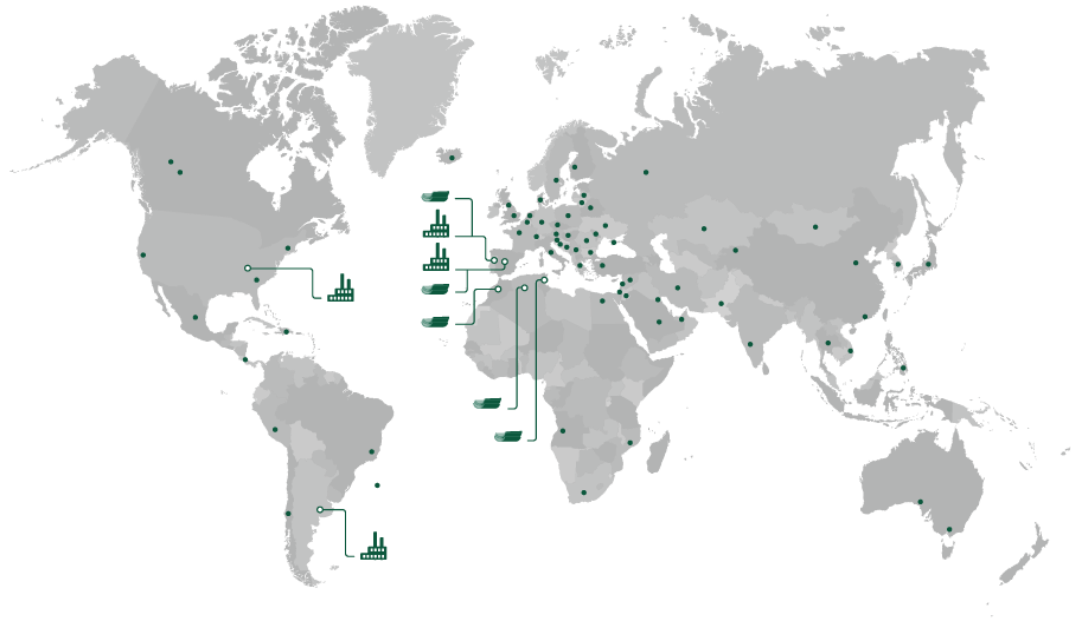


Figura 1 - Presença mundial da Corticeira Amorim¹

O grupo tem como missão acrescentar valor à cortiça, de forma competitiva, diferenciada e inovadora, em perfeita harmonia com a Natureza. Seguindo o lema “*Nem um só mercado, nem um só cliente, nem uma só divisa, nem um só produto*”, o grupo prosperou e deu a conhecer a cortiça ao mundo, destacando-se em setores como o imobiliário, financeiro, telecomunicações e turismo.

O grupo está dividido em várias unidades de negócio, tal como se pode observar na Figura 2. Uma delas é a UN Aglomerados Compósitos, na qual esta dissertação em ambiente empresarial foi realizada.



Figura 2 - Unidades de negócio do Grupo Amorim²

Esta unidade, a mais tecnológica do grupo, é uma referência mundial na pesquisa, desenvolvimento e produção de novas soluções de compósitos de cortiça. Nesta área, a qualidade é encarada como algo de extrema importância, uma vez que como clientes estão algumas das indústrias mais exigentes do mundo como, por exemplo, a indústria aeroespacial.

Como se pode constatar pela Figura 3, a UN Aglomerados Compósitos é, de todas as unidades, a que atualmente tem presenciado maior crescimento e, por esse motivo, está a ganhar cada vez mais importância dentro do grupo.

¹ Fonte: http://www.amorim.com/images/dbimages/mapa_web_926.png

² Fonte: <http://agriculturaemar.com/vendas-da-corticeira-amorim-crescem-8-aumento-da-unidade-rolhas/>

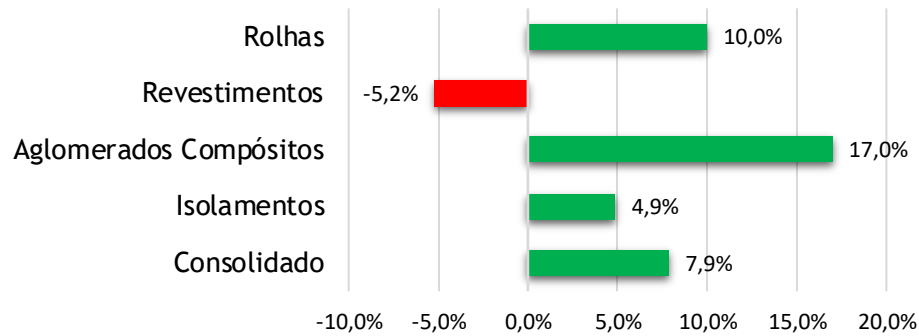


Figura 3 - Evolução das vendas do Grupo Amorim de 2014 para 2015

1.3 Amorim Cork Composites

Com o crescimento do volume de negócios, o grupo sentiu a necessidade de aproveitar o desperdício do setor das rolhas. Nesse sentido, em 2008 foi criada a *Amorim Cork Composites*, com o objetivo de aproveitar 70% desse desperdício e usá-lo como matéria-prima para a criação de uma vasta gama de materiais destinados a variadas indústrias. Apostando na inovação e sustentabilidade, a empresa continua a criar novas soluções de cortiça, procurando conquistar novos mercados.

Nos dias de hoje, há cada vez mais interesse pelos produtos em cortiça e o volume de encomendas está a aumentar, por esse motivo, a empresa está a passar por uma forte reestruturação interna, a fim de dar resposta ao crescimento que se tem verificado nos últimos tempos.

Na Figura 4 apresenta-se o organigrama das operações da empresa, com destaque para a área em que o projeto se inseriu, a área de transformação da Unidade Industrial CNM (*Cork Natural Materials*).

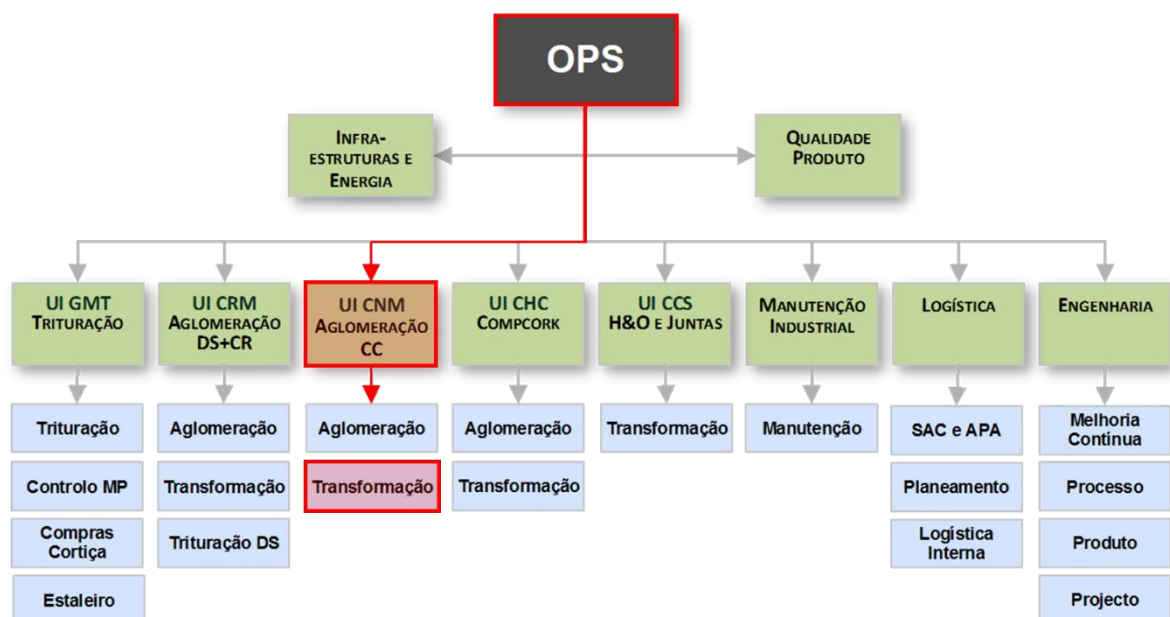


Figura 4 - Organigrama da área de operações da empresa

1.4 Objetivos do Projeto

A empresa propôs que fossem feitas melhorias na linha H263 de laminagem de blocos de cortiça, inserida na área de transformação. Estas ações deveriam focar-se em três vertentes:

Objetivo Principal

- Elaboração de um modelo de previsão do *lead time* de laminagem para auxílio ao planeamento da produção;

Objetivos Secundários

- Identificação e redução dos tempos de paragem da linha;
- Quantificação do material desperdiçado resultante da operação das máquinas;

O intuito era melhorar uma linha de grande importância para a empresa, tentando torná-la mais eficiente, para que, dessa forma, esta pudesse dar uma melhor resposta às exigências atuais do mercado.

1.5 Método Seguido no Projeto

A realização deste projeto pressupôs um planeamento das várias atividades, tendo em conta o horizonte temporal disponível. Este planeamento teve como objetivo a criação de um fio condutor para o projeto, de forma a permitir a melhor rentabilização do tempo e a obtenção de um resultado benéfico para a empresa.

Na Tabela 1 pode observar-se a estrutura que foi definida para o projeto.

Tabela 1 - Cronograma

	Atividade	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
1ª Fase	Conhecimento da linha de produção					
	Identificação dos fatores críticos					
	Diagnóstico de problemas					
2ª Fase	Recolha e análise de dados					
	Identificação de possíveis pontos de atuação					
3ª Fase	Traçar ações de melhoria					
	Implementar ações de melhoria e elaborar o modelo preditivo					
4ª Fase	Confirmação de resultados					
5ª Fase	Finalização do projeto					

1ª Fase – A primeira etapa consistiu essencialmente na observação e conhecimento da linha. Desta forma, pretendia-se compreender todo o seu funcionamento, estabelecer um primeiro contacto com os operadores e começar a fazer o diagnóstico de alguns problemas.

2ª Fase – Em seguida, procedeu-se à recolha de dados. Fez-se uma série de observações ao funcionamento dos equipamentos, contabilizando vários tempos, como tempos de *setup*, de

ciclo e de paragem. Para os tempos de paragem, fez-se um registo o mais minucioso possível das causas que os originam, de forma a possibilitar uma análise posterior, com vista à identificação de quais as que têm maior influência no problema. Observou-se também o material desperdiçado na operação das máquinas, ou seja, todo o desperdício que não é devido a defeitos na matéria-prima. Os dados foram sendo analisados e foi-se percebendo quais os pontos críticos do processo e pensando em quais deles se poderia atuar.

3ª Fase – Nesta fase, definiu-se onde e de que forma se iria atuar a nível de melhorias no processo e, em seguida, passou-se à implementação das ações. Paralelamente, elaborou-se o modelo de previsão do *lead time*.

4ª Fase – Esta fase foi dedicada ao teste do modelo. Pretendia-se verificar se o modelo fornecia uma previsão mais correta dos tempos de fabrico comparativamente com as previsões já existentes, de forma a facilitar o planeamento da produção. Por outro lado, pretendia-se observar novamente a linha e tirar conclusões em relação ao impacto das melhorias propostas.

5ª Fase – Esta última fase foi dedicada à finalização do projeto, destinando-se à realização de pequenos ajustes finais e últimas correções ao trabalho realizado.

1.6 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No presente capítulo, o primeiro, é feita a apresentação da empresa e do projeto, bem como a sua contextualização. São também definidos os objetivos e explicitado o método seguido. No segundo capítulo, é feito o enquadramento teórico relativo às ferramentas e metodologias utilizadas na realização do projeto, pretendendo-se que estas sejam descritas e explicadas. Descrevem-se também conceitos que estarão presentes ao longo da dissertação. O terceiro capítulo consiste na descrição e análise do estado inicial da linha de produção. É feita primeiramente a descrição da linha, onde são apresentadas as várias máquinas que a constituem, bem como os produtos que dela resultam. Em seguida, é descrito o processo produtivo, bem como toda a análise e diagnóstico realizados. No quarto capítulo é apresentado o modelo de previsão do *lead time*. É explicado o seu processo de elaboração, primeiramente, toda a parte estatística e, em seguida, o modelo em Excel. No capítulo seguinte, o quinto, apresentam-se as melhorias propostas e o impacto da implementação das mesmas na linha. O sexto e último capítulo inclui as conclusões resultantes da realização do projeto e algumas sugestões que poderiam ser o mote para trabalhos futuros.

2 Enquadramento Teórico

No presente capítulo é realizada uma breve revisão bibliográfica de conceitos e metodologias utilizados na realização da dissertação. São abordados métodos para estimar o *lead time*, sendo apresentado em maior detalhe o método de análise multivariada, utilizado como base para a criação do modelo de previsão de *lead time*. É também apresentado o Princípio de Pareto, utilizado várias vezes ao longo do projeto. Por fim, apresenta-se o Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

2.1 Métodos para Estimar o *Lead Time*

O *lead time* (LT) é um indicador crítico da performance produtiva de qualquer indústria. Há vários fatores que o afetam, como a capacidade, a carga, o lote e o planeamento, e estes, por sua vez, têm influência em muitos aspetos de custos e de controlo (Karmarkar 1993).

O compromisso de entregar as encomendas ao cliente a tempo é uma consequência direta da estimativa do LT. Um LT curto melhora a imagem da empresa e aumenta o potencial de vendas futuras. No entanto, é desejável que essa estimativa não só seja curta, mas também fidedigna e precisa (Öztürk et al. 2006).

Num trabalho inicial feito por Tatsiopoulos and Kingsman (1983) são propostas duas abordagens distintas para a determinação dos valores do *lead time* de fabrico que serão usados no planeamento e em sistemas de controlo. Na primeira abordagem, esta determinação é feita através da estimativa de variáveis independentes e incontroláveis. Neste caso, trata-se de um problema de previsão, com ênfase em minimizar o impacto dos erros dessa mesma previsão. A segunda abordagem foca-se no controlo e procura gerir a média dos LT, de forma a cumprir normas pré-estabelecidas.

Geralmente, na indústria, o operador é capaz de fazer uma estimativa inicial do tempo de fabrico, através da análise das características do novo produto. No entanto, esta estimativa é empírica e a sua precisão pode desviar-se bastante da realidade (Mourtzis et al. 2014). Há, por isso, necessidade de fazer uma previsão mais consistente e sustentada, de forma a que esta seja o mais próxima possível da realidade. Nesse sentido, vários métodos foram propostos para estimar o LT (Figura 5): simulação, teoria das filas, curvas logísticas, estatística, análise estocástica, métodos de inteligência artificial e métodos híbridos (Mourtzis et al. 2014).

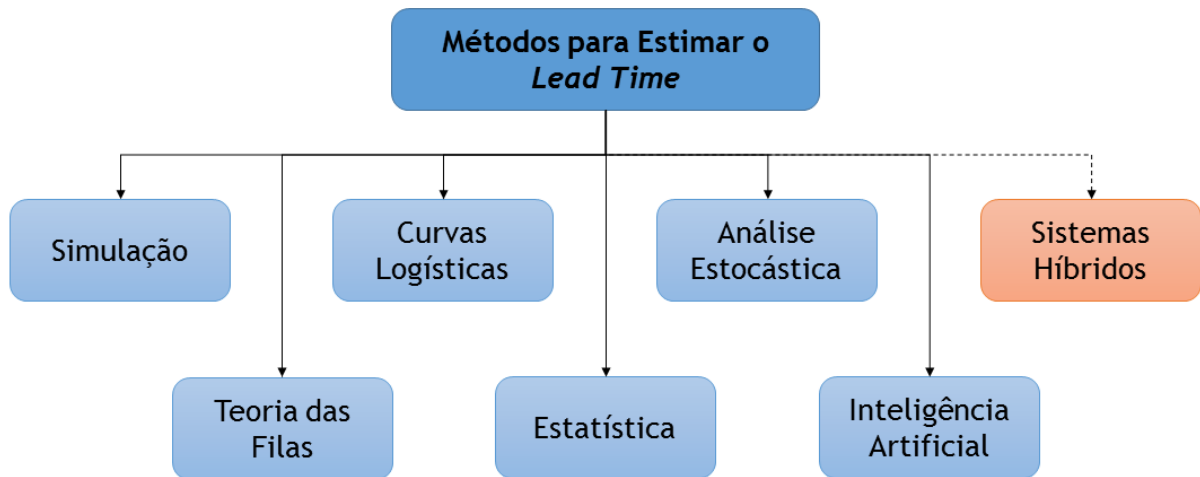


Figura 5 - Métodos para estimar o lead time (Mourtzis et al. 2014)

2.1.1 Simulação

Hoje em dia, a simulação é uma técnica muito utilizada no *design* e otimização de sistemas complexos. Consiste na criação de um modelo que retrate um processo dinâmico, com o objetivo de retirar conclusões que possam ser transpostas para a realidade. Usando a simulação, é possível modelar sistemas reais em programas informáticos, possibilitando a análise e descrição do seu comportamento quando se alteram os parâmetros da simulação (Nyhuis et al. 2005).

A simulação apresenta como vantagens a possibilidade de adaptar os modelos, permitir a análise de sistemas discretos e ter um elevado grau de aceitação. No entanto, implica bastante esforço na fase de aplicação e não permite obter conclusões e validações gerais (Nyhuis et al. 2005).

2.1.2 Teoria das Filas

Os modelos que utilizam a Teoria das Filas (*Queuing Theory*) consistem em sistemas analíticos para a descrição das interdependências entre indicadores de performance logística. Estes modelos consideram as características estocásticas dos processos que chegam ou que se encontram ativos num servidor que processa objetos de uma fila. Todos os processos que originam filas de objetos enquadram-se no campo de aplicação dos modelos *queuing* (Nyhuis et al. 2005).

Uma vez criado um modelo deste tipo válido para um dado sistema produtivo, é possível prever a sua performance logística. Consegue-se calcular o *WIP* (comprimento da fila), o *throughput time* (tempo de espera), a utilização (complemento da probabilidade de o servidor estar vazio) e o *output rate* (Nyhuis et al. 2005).

Este tipo de modelos tem a vantagem de ser de fácil aplicação e os seus parâmetros serem inferidos de princípios gerais. Em contrapartida, implicam um elevado esforço na fase de definição do sistema, apenas são válidos para estados operacionais estáveis, a sua adaptação é reduzida e os parâmetros podem não se adequar à realidade prática (Nyhuis et al. 2005).

2.1.3 Curvas Logísticas

Com o objetivo minorar o esforço de utilização de sistemas de simulação complexos, o *Institute of Production Systems and Logistics* (IPA) tentou criar equações de aproximação para calcular as curvas logísticas. O objetivo era desenvolver uma abordagem analítica que garantisse máxima validade e, simultaneamente, requeresse o mínimo de *inputs* possível (Nyhuis et al. 2005).

Na Figura 6 apresenta-se o procedimento concetual para a derivação do modelo.

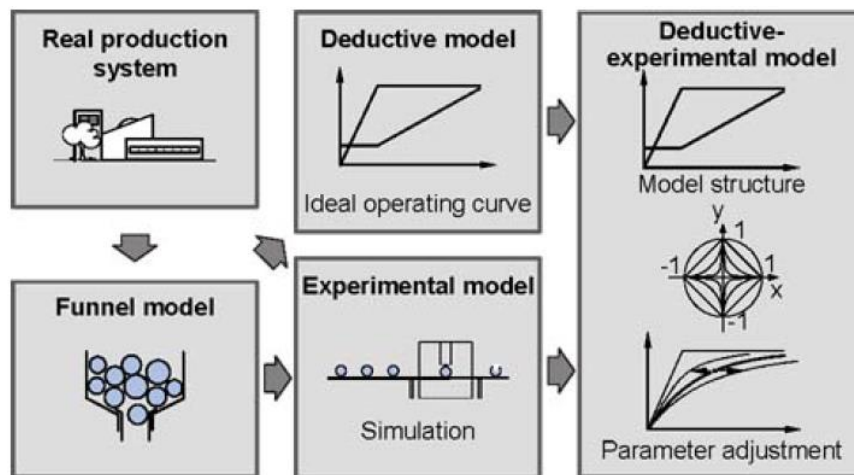


Figura 6 - Derivação de curvas operacionais logísticas (Nyhuis et al. 2005)

As vantagens principais deste tipo de abordagem são a sua fácil aplicação, a possibilidade de alguma adaptação dos modelos e o facto de os seus parâmetros serem inferidos de princípios gerais. No entanto, estes métodos implicam um elevado esforço na fase de definição do sistema e apenas são válidos para estados operacionais estáveis (Nyhuis et al. 2005).

2.1.4 Estatística

Em relação aos métodos estatísticos, estes examinam relações entre *order flow times* e outras variáveis consideradas importantes para um determinado sistema de produção. Por exemplo, Kaplan and Unal (1993) identificaram fatores que podem influenciar o *flow time* de determinada tarefa e selecionaram os mais significativos através de uma análise de correlação. Variados modelos de análise multivariada que combinam estes fatores foram desenvolvidos e avaliados tendo em conta a sua precisão e simplicidade (Ioannou and Dimitriou 2012).

2.1.5 Análise Estocástica

Uma das abordagens mais comuns para analisar a incerteza de variáveis que são usadas em problemas de tomada de decisão é a análise estocástica. A principal característica deste tipo de análise é descrição dos valores por funções de densidade probabilística, em detrimento de valores determinísticos (Seyedhosseini and Ebrahimi-Taleghani 2015).

2.1.6 Inteligência Artificial

Atualmente, os métodos mais robustos para estimar o *lead time* são os métodos de Inteligência Artificial (IA). De entre os vários métodos de IA, destaca-se o *Case Based Reasoning* (CBR). Este método foca-se em resolver problemas pela adaptação de soluções aceitáveis e comparando diferenças e semelhanças entre produtos anteriores e atuais. Distingue-se dos outros métodos, não apenas por utilizar conhecimentos anteriores para resolver novos problemas de maneira intuitiva, mas também pela exploração de medições de similaridade (Mourtzis et al. 2014).

2.2 Análise Multivariada

De entre os vários métodos de previsão do *lead time* referidos em 2.1, apresenta-se no presente subcapítulo mais detalhadamente um método estatístico – a análise multivariada.

A análise multivariada é um ramo da estatística que se dedica ao estudo de variáveis aleatórias que estão correlacionadas com uma outra variável. Se duas variáveis estão correlacionadas, o conhecimento do comportamento de uma delas fornece alguma informação sobre o comportamento da outra. Na prática, para descrever a probabilidade de ocorrência de muitos eventos é frequentemente necessário considerar várias variáveis aleatórias correlacionadas, em simultâneo (Press 2012).

Este tipo de análise consiste, essencialmente, na realização de uma regressão múltipla. A regressão múltipla é uma extensão da regressão linear simples e é utilizada quando se pretende prever o valor de uma variável (variável dependente), em função do valor de outras variáveis (variáveis independentes), duas ou mais. É possível saber o grau de ajuste do modelo aos dados fornecidos, bem como a contribuição relativa de cada uma das variáveis, podendo assim concluir-se quais as variáveis independentes que mais explicam a variação da variável dependente (LaerdStatistics 2015).

A análise multivariada tem dois objetivos principais: prever valores para a variável dependente em função de novos valores das variáveis independentes e determinar quanto da variação da variável dependente pode ser explicada pelas variáveis independentes.

Com o aumento do número de variáveis, a modelação estatística torna-se mais complexa, sendo importante ter uma metodologia definida a seguir. Uma vez recolhidos os dados, os passos típicos de uma análise multivariada são os seguintes (Baur and Lamnek 2007):

1. **Enquadramento do objetivo da pesquisa** para que este possa ser modelado matematicamente.
2. **Seleção do modelo estatístico adequado**, pois existem variados métodos para este tipo de análise e são constantemente desenvolvidas novas abordagens. Uma vez que todos os modelos multivariados procuram determinados padrões nos dados, a utilização de modelos diferentes diferenciara os padrões tidos em conta, o que pode levar à obtenção de resultados diferentes.
3. **Verificação que os pressupostos para o método escolhido são cumpridos**. No subcapítulo 2.2.1 serão apresentados estes pressupostos.
4. **Preparação dos dados para análise**.
5. **Computação do modelo** utilizando *software* estatístico específico como o SPSS, SAS ou Stata.

6. **Interpretação dos resultados da análise.** Os resultados têm sempre de ser interpretados, uma vez que a estatística pode ajudar a interpretar dados, mas não prova teorias.

2.2.1 Pressupostos de uma Análise Multivariada

No passo 3. do subcapítulo 2.2 é referido que certos pressupostos devem ser cumpridos para que determinado método de análise multivariada possa ser aplicado. Neste subcapítulo serão descritos os pressupostos gerais de uma análise multivariada.

Quando se pretende fazer uma análise deste tipo há 8 pressupostos que devem ser verificados. A sua verificação é imprescindível para garantir que os dados que se pretende estudar podem realmente ser analisados usando uma análise multivariada e que o resultado obtido será válido. Os pressupostos são os seguintes (LaerdStatistics 2015):

1. **As variáveis dependentes são medidas numa escala contínua.**
2. **Há duas ou mais variáveis independentes, sendo que estas podem ser contínuas ou categóricas.**
3. **Há independência nas observações.**
4. **Há uma relação linear entre (a) a variável dependente e cada uma das variáveis independentes, e entre (b) a variável dependente e as variáveis independentes coletivamente.**
5. **Os dados revelam ter homocedasticidade de resíduos.** Isto significa que os resíduos são iguais para todos os valores da variável dependente estimada. Por outras palavras, as variâncias mantêm-se similares ao longo da linha de regressão.
6. **Os dados não revelam multicolinearidade.** Significa que duas ou mais variáveis independentes estão altamente correlacionadas entre elas. Neste caso, surgem problemas em perceber que variáveis independentes contribuem para a variância revelada pela variável dependente, bem como problemas técnicos ao calcular o modelo de regressão múltipla.
7. **Não existência de pontos *outliers*.** Um *outlier* consiste numa observação que é, de alguma forma, incomum e que poderá distorcer os resultados que se irão obter aquando da realização da regressão múltipla. A sua existência poderá reduzir a precisão de previsão dos resultados, bem como o seu significado estatístico.
8. **Os resíduos (erros) são normalmente distribuídos.**

2.3 O Princípio de Pareto e Análise ABC

O padrão por detrás deste princípio foi descoberto em 1897 pelo economista italiano Vilfredo Pareto (1848-1923), quando este analisava padrões de riqueza em Inglaterra. Pareto apercebeu-se que a maioria da riqueza e dinheiro que entrava no país se canalizava para uma minoria de pessoas. Entrou em mais detalhe, e afirmou que apenas 20% da população usufruía de 80% da riqueza. Mais importante, Pareto percebeu que a distribuição da riqueza pela população era previsivelmente desequilibrada. Desde aí, a sua descoberta é conhecida por vários nomes como Princípio de Pareto, Lei de Pareto, Princípio 80/20, entre outros (Koch 2011).

Concretizando, o Princípio de Pareto estabelece que 20% das causas, *inputs* ou esforços, geralmente são responsáveis por 80% dos resultados, *outputs* ou ganhos e que, por esse motivo, há um desequilíbrio entre causas e resultados (Figura 7). Este princípio deve ser usado por qualquer organização, uma vez que permite obter maior proveito com menos esforço. (Koch 2011).

Pareto foca os esforços nos problemas que oferecem o maior potencial de melhoria, levando quem o usa a concentrar-se naquelas causas, que terão o maior impacto se forem solucionadas (Ziarati 2006).

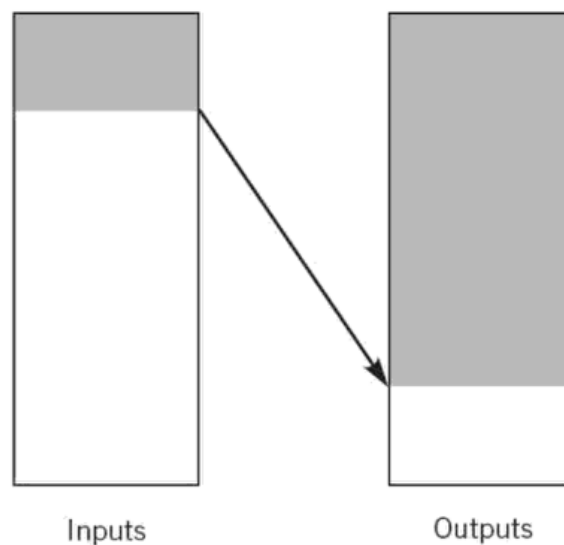


Figura 7 - Desequilíbrio entre *inputs* e *outputs* (Koch 2011)

Baseado no Princípio de Pareto, surgiu um modelo de classificação bem conhecido e prático chamado Análise ABC (Ng 2007). Esta análise, muitas vezes usada para classificar *stocks*, permite separá-los em três grupos: A – Muito importante, B – Importante e C – Menos importante. Assim, a quantidade de tempo, esforço e recursos gastos no controlo do inventário, devem ter em consideração a importância relativa de cada item (Chu et al. 2008).

2.4 *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)*

Quando se pretende comparar a performance de métodos de previsão através de diferentes séries temporais, indicadores como, por exemplo, o erro médio absoluto são inapropriados (Goodwin and Lawton 1999). Isto acontece porque existem frequentemente variações na escala das observações entre séries, sendo que poucas séries com elevados valores podem dominar as comparações (Chatfield 1988). Nestas circunstâncias, surge a necessidade de utilizar indicadores sem unidades, e o *Mean Absolute Percentage Error (MAPE)* é, provavelmente, o mais utilizado (Goodwin and Lawton 1999).

Para períodos de 1 a N , o MAPE no período t é definido como:

$$MAPE = \frac{100}{N} * \sum_{t=1}^N \left| \frac{R_t - P_t}{R_t} \right| \quad (2.1)$$

Onde:

R_t . é o valor real no período t

P_t . é o valor previsto no período t

3 Caso de Estudo

3.1 Descrição da Linha

A linha H263 situa-se na Unidade Industrial CNM (*Cork Natural Materials*), na área de transformação, e nela é realizada a laminagem de blocos de cortiça, de forma a obter-se placas de variadas espessuras. Tal como se pode observar na Figura 8, a linha é constituída por 3 zonas: a da retificadora, a das laminadoras e a de embalagem, tendo ainda um supermercado.

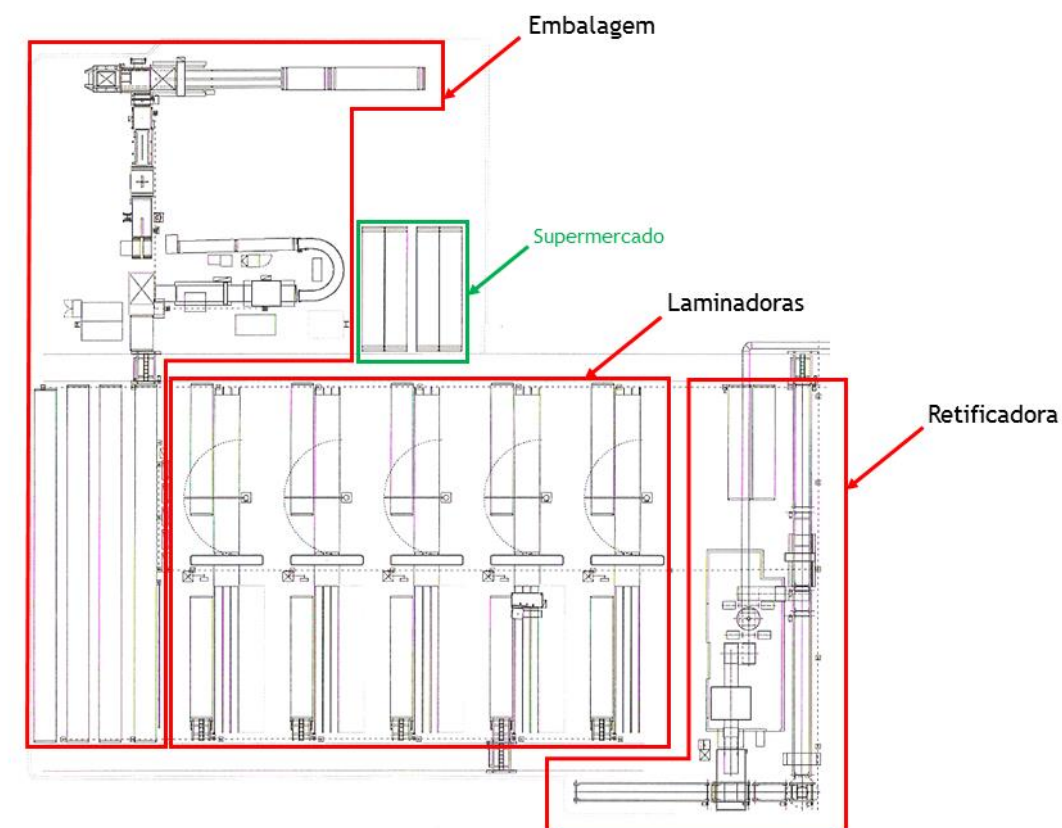


Figura 8 - Planta da linha

Embora a linha seja composta pelas 3 zonas anteriormente referidas, o objeto de estudo desta dissertação foi apenas as zonas da retificadora e das laminadoras. Estas duas áreas incluem 6 máquinas: 1 retificadora e 5 laminadoras, cujos nomes são Lam001, Lam003, Lam007, Lam008 e Lam012. Todas as máquinas operam 5 dias por semana em turnos de 8 horas, sendo que a retificadora trabalha em 3 turnos e as laminadoras apenas em 2.

3.1.1 Retificadora

A retificadora tem como função tornar as faces dos blocos planas. Essa tarefa é realizada através de serras em forma de discos que, em rotação, fazem o desbaste das faces dos blocos, removendo algum material e assim tornando-as uniformes.

A retificadora (Figura 9) que se encontra nesta área da fábrica tem um funcionamento automático. O operador é responsável por ir buscar as paletes com os blocos que vão ser retificados ao armazém de blocos e colocá-los na linha de entrada da máquina, sendo que posteriormente esta faz todo o processo de retificação autonomamente, terminando a empilhar os blocos retificados novamente numa palete.



Figura 9 - Retificadora

3.1.2 Laminadoras

As laminadoras são os equipamentos responsáveis por realizar o corte dos blocos em placas. Como se pode observar na Figura 10, estas máquinas possuem um cabeçote móvel, onde se encontra a lâmina, e uma mesa basculante, onde são colocados os blocos de cortiça. O cabeçote move-se na vertical, sendo que a sua deslocação define a altura da lâmina e, consequentemente, a espessura que se irá obter nas placas laminadas. A mesa, por sua vez, realiza a um movimento de vai e vem horizontal e, deste modo, faz os blocos passar pela lâmina de forma a realizar o corte.



Figura 10 - Laminadora: mesa com blocos (esquerda) e cabeçote (direita)

3.2 Descrição dos Produtos

Nesta linha, são laminados cerca de 57 materiais diferentes e, para cada material, as placas que se obtêm podem ter uma série de espessuras diferentes, variando desde os 0.7 mm até aos 25 mm. Naturalmente, a gama de referências é bastante grande, porém o tipo de produto é sempre o mesmo – placas de cortiça (Figura 11).



Figura 11 - Placas de cortiça em palete

Entre as várias referências difere essencialmente o tamanho de grão, o tipo de granulado e a densidade. Quando se trata de referências mais densas, o processo de laminagem é um pouco mais delicado, uma vez que o esforço de corte é maior. Em alguns casos é necessário laminar os blocos a quente, de forma a reduzir a força de corte necessária e a facilitar a operação de laminagem.

De acordo com a sua largura e comprimento, os blocos dividem-se em dois tipos: blocos com medidas métricas e blocos com medidas inglesas. Na Figura 12 pode observar-se as dimensões dos dois tipos de blocos³. Relativamente às dimensões das placas, a sua espessura é definida nas laminadoras, a largura e o comprimento são os mesmos dos blocos.

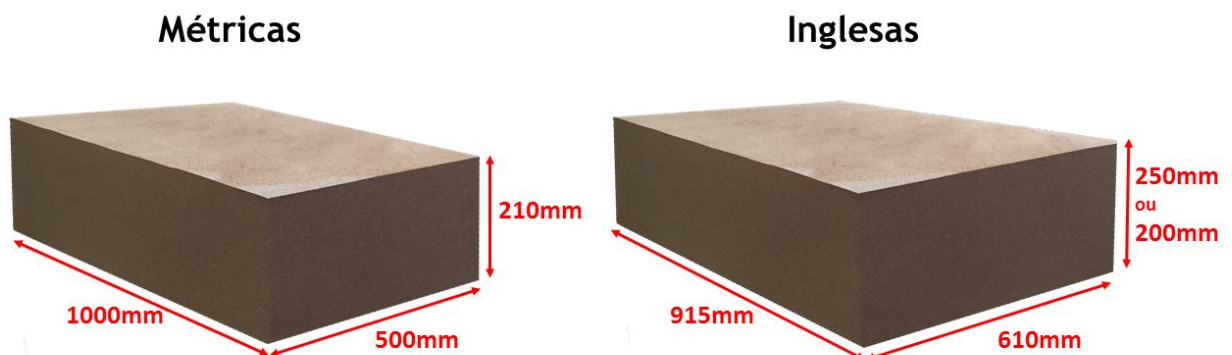


Figura 12 - Dimensões dos blocos de cortiça

³ As dimensões apresentadas correspondem às dimensões finais dos blocos, após estes terem sido retificados na retificadora. Estes valores são teóricos, sendo que na prática é comum haver algumas variações nas medidas.

3.3 Descrição do Processo Produtivo

Os blocos de cortiça chegam à linha vindos do armazém de blocos e, dependendo da necessidade de serem ou não retificados, passam pela retificadora ou vão diretamente para as laminadoras. Posteriormente, seguem para a embalagem. O processo está descrito no fluxograma da Figura 13 e será explicado com mais detalhe seguidamente.

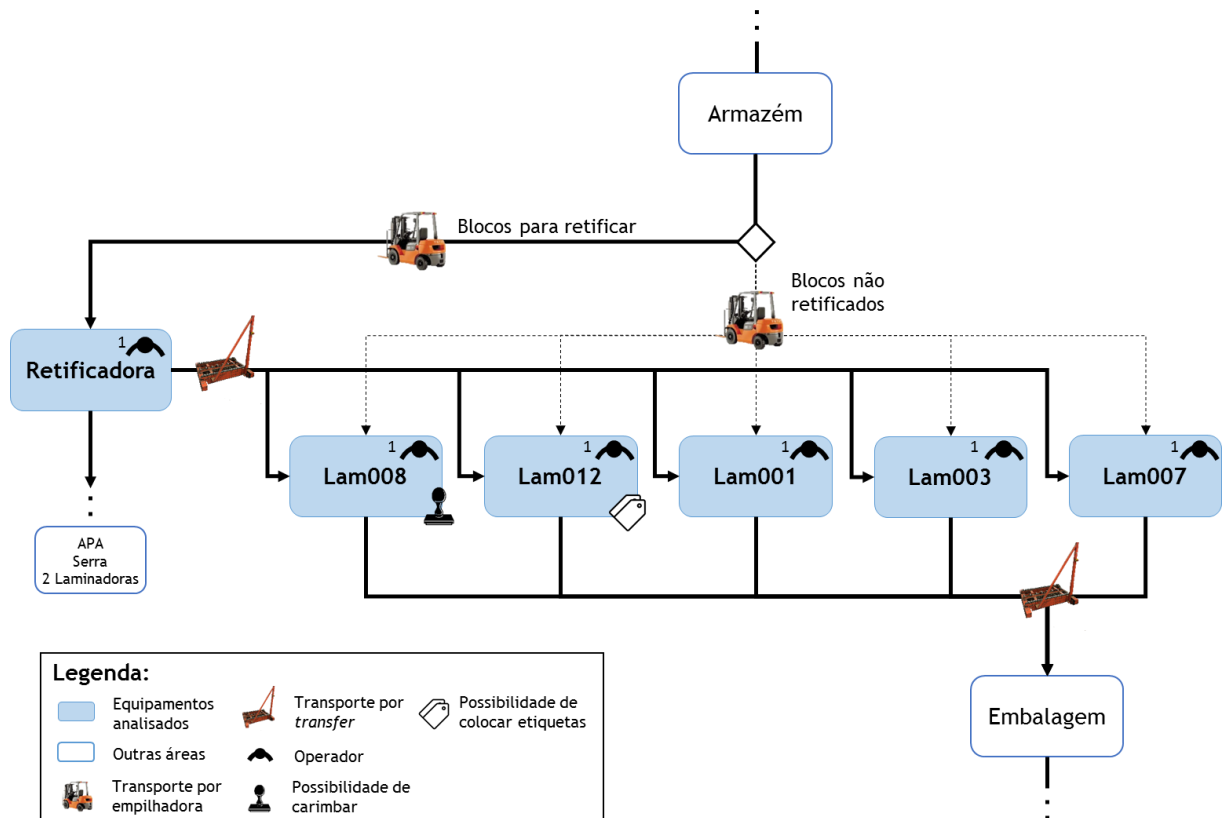


Figura 13 - Fluxograma da linha

O operador da retificadora é o responsável por fornecer material às laminadoras. Quando os blocos não são retificados, ele transporta-os com a empilhadora diretamente do armazém para as laminadoras, quando são retificados, ele transporta-os com a empilhadora do armazém para a retificadora e, em seguida, estes são transportados para as laminadoras pelo *transfer*.

Uma vez nas laminadoras, as paletes com os blocos ficam em fila de espera no tapete de entrada, em seguida os blocos são laminados em placas e estas são novamente empilhadas em paletes e colocadas em fila de espera, no tapete de saída. Posteriormente, o *transfer* transporta as paletes até à embalagem.

3.3.1 Setup das Laminadoras

É importante realçar que nestas máquinas o *setup* não é apenas realizado quando se altera o tipo de produto que está a ser produzido. Sempre que uma mesa de blocos é laminada é necessário realizar este procedimento para que se possa laminar a mesa seguinte.

O *setup* das laminadoras consiste essencialmente em três etapas distintas, que são explicitadas seguidamente.

A **primeira etapa** é a colocação dos blocos na mesa. Para a realizar, o operador recorre a um manipulador, que funciona como uma espécie de pinça, para pegar um a um nos blocos da paleta na linha de entrada e colocá-los na mesa da laminadora.

Na **segunda etapa** é realizada a limpeza dos blocos. Esta etapa consiste na realização de algumas “passagens” dos blocos na lâmina da laminadora, com uma espessura de corte muito fina. O objetivo é eliminar todos os defeitos que possam existir na face superior dos mesmos, de forma a torná-la perfeitamente plana e uniforme, para que, seguidamente, se possa realizar a laminagem.

Nota: Em teoria, os blocos após saírem da retificadora deveriam estar em perfeitas condições para serem laminados em seguida, sem haver necessidade de realizar esta limpeza nas laminadoras. No entanto, tal não acontece, e esta etapa é imprescindível para assegurar que os blocos cumprem os requisitos necessários para serem laminados.

No caso de os blocos não terem sido retificados, é necessário realizar esta limpeza não só na face superior do bloco mas também na inferior, para garantir que a face de contacto com a mesa está plana. É bastante importante que os blocos estejam perfeitamente apoiados na mesa, para evitar que surjam oscilações que iriam prejudicar a operação de laminagem. É então necessário fazer a limpeza num lado, virar todos os blocos 180° e realizar a limpeza no outro. É uma operação um pouco mais trabalhosa e demorada.

A **terceira etapa** engloba todas as tarefas que são necessárias realizar no período desde que termina a laminagem de uma mesa de blocos até ao início da colocação de novos blocos na mesa seguinte. No caso de a encomenda não ter terminado, estas tarefas incluem essencialmente a remoção das sobras dos blocos que se estava a laminar (fundos) e o preenchimento de cartões *kanban*⁴ de identificação de paletes. Caso a encomenda tenha terminado, o processo é um pouco mais demorado pois inclui as fases já mencionadas, mais o cálculo do número de blocos utilizados e das placas rejeitadas, preenchimento da declaração de produção e declaração de paragens, abertura de nova ordem de fabrico no computador, consulta da caixa de nivelamento para ver qual a encomenda seguinte e abertura de nova ordem no computador.

Ao longo deste documento, a primeira, segunda e terceira etapas do *setup* serão designadas por **colocação dos blocos na mesa**, **limpeza de blocos** e **fim de blocos**, respetivamente.

A Figura 14 representa de forma esquemática o ciclo composto pelas várias etapas de *setup*.

⁴ Cartão *Kanban*: cartão de sinalização que controla os fluxos de produção numa indústria.

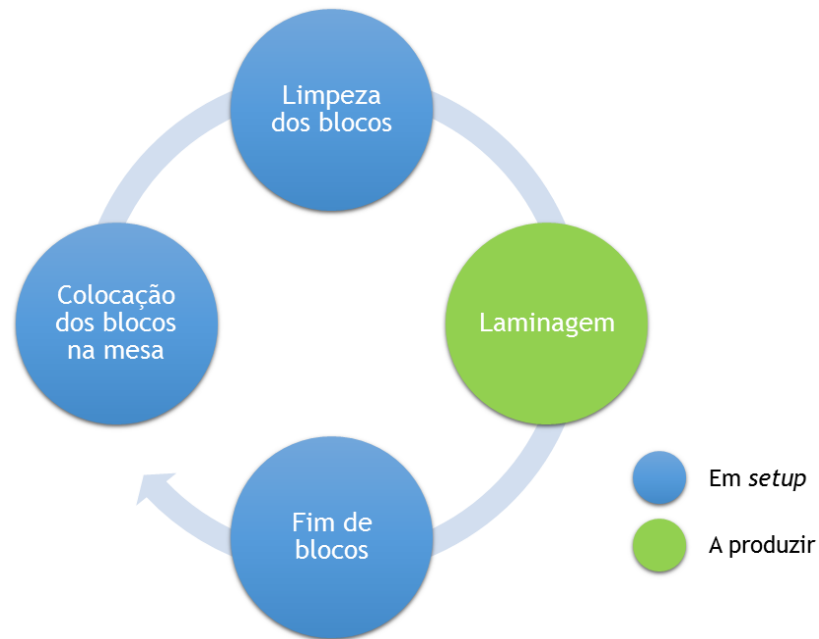


Figura 14 - Etapas de *setup* das laminadoras

3.4 Diagnóstico e Análise da Linha

Nesta secção será apresentada a análise que foi feita à linha. Este diagnóstico permitiu identificar problemas e perceber onde se poderia atuar posteriormente. É explicada a recolha de dados que foi realizada e todo seu tratamento posterior.

3.4.1 Referências A, B, C

Uma das primeiras preocupações quando se iniciou este projeto foi perceber quais as referências mais significativas, ou seja, as mais produzidas na linha, de forma a que estas fossem o foco principal da análise que seria feita posteriormente. Para isso, recorreu-se aos dados relativos à produção do ano de 2016 e fez-se uma análise de Pareto, de forma a dividir as referências em três grupos A, B, C (Figura 15).

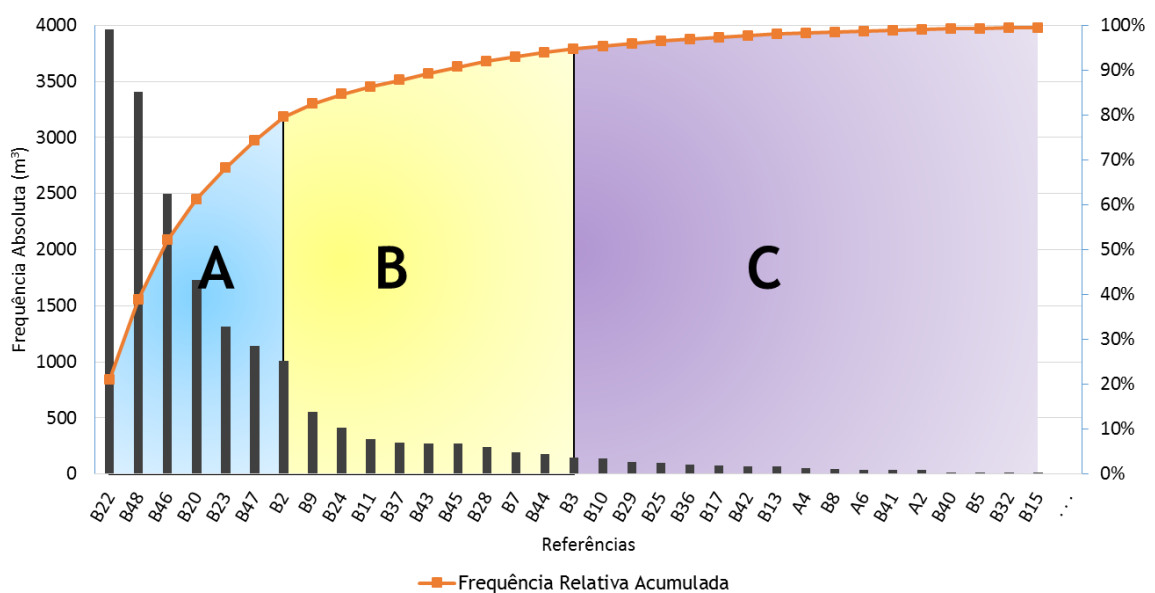


Figura 15 - Diagrama de Pareto relativo às referências produzidas em 2016

Tendo em conta que cada referência pode ser laminada numa vasta gama de espessuras, foi necessário averiguar quais as espessuras mais comuns para as referências com mais saída. Assim, para todas as referências do grupo A e parte das do grupo B, foi-se procurar quais as espessuras mais produzidas.

Após esta seleção, a análise tornou-se mais orientada e tentou centrar-se a recolha de dados nas referências e espessuras que se concluiu serem mais relevantes.

3.4.2 Recolha e Análise de Tempos de Paragem - Laminadoras

Para ir de encontro aos objetivos do projeto foi necessário fazer uma série de observações na linha de produção em questão. As observações consistiram em recolhas de dados relativos às paragens e micro paragens da linha, nas quais foram contabilizados todos os tempos de paragem observados em cada laminadora e o respetivo motivo. Dessa forma, pretendia-se obter uma amostra que fosse representativa dos tempos improdutivos da linha e das causas que os originam, para que, posteriormente, se pudesse fazer uma análise sustentada e fundamentada.

Foram feitas um total de 35 horas de observações, distribuídas pelas 5 laminadoras, sendo que cada observação teve a duração de 1 hora. As observações foram feitas a variadas horas, para que fossem registados dados relativos aos dois turnos e a diferentes momentos dentro de cada turno. Registou-se então a data e a hora, a laminadora em questão, a referência do material, a espessura de laminação, o tempo de ciclo (que será muito importante para o modelo de previsão do *lead time*), os motivos de paragem e os respetivos tempos.

Na Figura 16 apresenta-se o cabeçalho da tabela utilizada para o registo dos tempos improdutivos.

Registo dos Tempos Improdutivos										
Data	Código	Lam	Hora Início	Tempo Obs.	Ref	Esp	T. Ciclo	Nº Paragem	Motivo Paragem	Tempo Paragem

Figura 16 - Cabeçalho da tabela de registo de tempos improdutivos

É importante referir que, embora a empresa já tivesse registos prévios relativos às paragens da linha, os dados utilizados na presente dissertação foram recolhidos de raiz, sem a inclusão ou utilização de dados retirados desses mesmos registos. Procedeu-se desta forma, uma vez que os dados que a empresa recolhe apenas contabilizam as paragens que excedem os 5 minutos e neste projeto pretendia-se um registo mais detalhado, que incluísse também as micro paragens. Para além disso, os motivos e tempos indicados nesses registos da empresa poderão não corresponder exatamente ao que efetivamente ocorre na linha.

Após a recolha de dados, estes foram organizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados recolhidos relativos às paragens das laminadoras

Motivos Paragem	Lam007		Lam003		Lam001		Lam012		Lam008		Total de Paragens por Motivo	% do total de paragens
	Paragens	% do total de paragens	Paragens	% do total de paragens	Paragens	% do total de paragens	Paragens	% do total de paragens	Paragens	% do total de paragens		
Afinações máquina (parte de trás)	00:00:00	0,0%	00:13:00	6,4%	00:01:30	1,3%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:14:30	1,55%
Ajustes no carimbo									00:04:00	2,4%	00:04:00	0,43%
Ajustes no dispensador de etiquetas							00:14:00	10,3%			00:14:00	1,50%
Análise de defeitos	00:03:22	1,1%	00:05:55	2,9%	00:01:30	1,3%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:10:47	1,15%
Ausência operador	00:23:17	7,5%	00:14:56	7,4%	00:13:10	11,3%	00:26:15	19,2%	00:22:52	13,6%	01:40:30	10,75%
Buscar palete para pôr os laminados	00:01:00	0,3%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:01:00	0,7%	00:05:00	3,0%	00:07:00	0,75%
Cintar Palete	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:08:50	7,6%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:08:50	0,94%
Colocação de blocos na mesa	01:01:32	19,8%	00:42:47	21,1%	00:20:58	17,9%	00:39:25	28,9%	00:44:19	26,4%	03:29:01	22,36%
Falta de abastecimento de blocos	00:11:34	3,7%	00:00:00	0,0%	00:05:00	4,3%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:16:34	1,77%
Fim de blocos	00:57:43	18,6%	00:25:26	12,5%	00:27:57	23,9%	00:14:18	10,5%	00:32:06	19,1%	02:37:30	16,85%
Limpeza de blocos	01:02:35	20,1%	00:29:07	14,4%	00:26:05	22,3%	00:28:20	20,8%	00:44:27	26,4%	03:10:34	20,38%
Mudança de lâmina	01:13:00	23,5%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	01:13:00	7,81%
Mudança de parâmetros da máquina	00:04:50	1,6%	00:01:30	0,7%	00:04:30	3,8%	00:04:00	2,9%	00:00:00	0,0%	00:14:50	1,59%
Plano de corte desafinado	00:00:00	0,0%	00:35:00	17,3%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:35:00	3,74%
Reajustar inclinação bloco	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:01:25	1,2%	00:01:15	0,9%	00:02:21	1,4%	00:05:01	0,54%
Retirar Desperdícios	00:05:00	1,6%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:00:00	0,0%	00:05:00	0,53%
Tirar anotações	00:06:49	2,2%	00:31:07	15,4%	00:05:00	4,3%	00:07:22	5,4%	00:09:46	5,8%	01:00:04	6,43%
...Outros...	00:00:00	0,0%	00:03:53	1,9%	00:01:00	0,9%	00:00:30	0,4%	00:03:18	2,0%	00:08:41	0,93%
Total Paragens por Máquina	05:10:42	64,73%	03:22:41	42,23%	01:56:55	32,48%	02:16:25	37,89%	02:48:09	40,04%	15:34:52	
Tempo de Observação	08:00:00		08:00:00		06:00:00		06:00:00		07:00:00		35:00:00	

Na Tabela 2 pode observar-se os tempos de paragem divididos por laminadora e consoante o respetivo motivo. Para cada laminadora existem duas colunas: a da esquerda representa a frequência absoluta, ou seja, o tempo total que a laminadora X esteve parada devido a um motivo Y; a da direita representa a frequência relativa, ou seja, a percentagem de tempo que a laminadora X esteve parada devido ao motivo Y, em relação ao tempo total de paragem da laminadora em questão. A vermelho encontra-se assinalado o motivo que originou mais tempos de paragem para cada uma das máquinas e a rosa, estão assinalados os dois motivos seguintes. Na zona inferior da tabela, para cada uma das laminadoras, encontram-se os tempos totais de observação e acima (a amarelo) o tempo total de paragem em todo o conjunto das observações, bem como a respetiva percentagem que este representa.

A Tabela 3 sintetiza os valores médios das paragens para cada laminadora.

Tabela 3 - Média de paragens por laminadora

Laminadora	% Paragens no tempo total de observação
Lam001	32.48%
Lam003	42.23%
Lam007	64.73%
Lam008	40.04%
Lam012	37.89%

Em seguida, na Figura 17, realizou-se novamente uma análise de Pareto para perceber quais os motivos com maior impacto nos tempos improdutivos da linha.

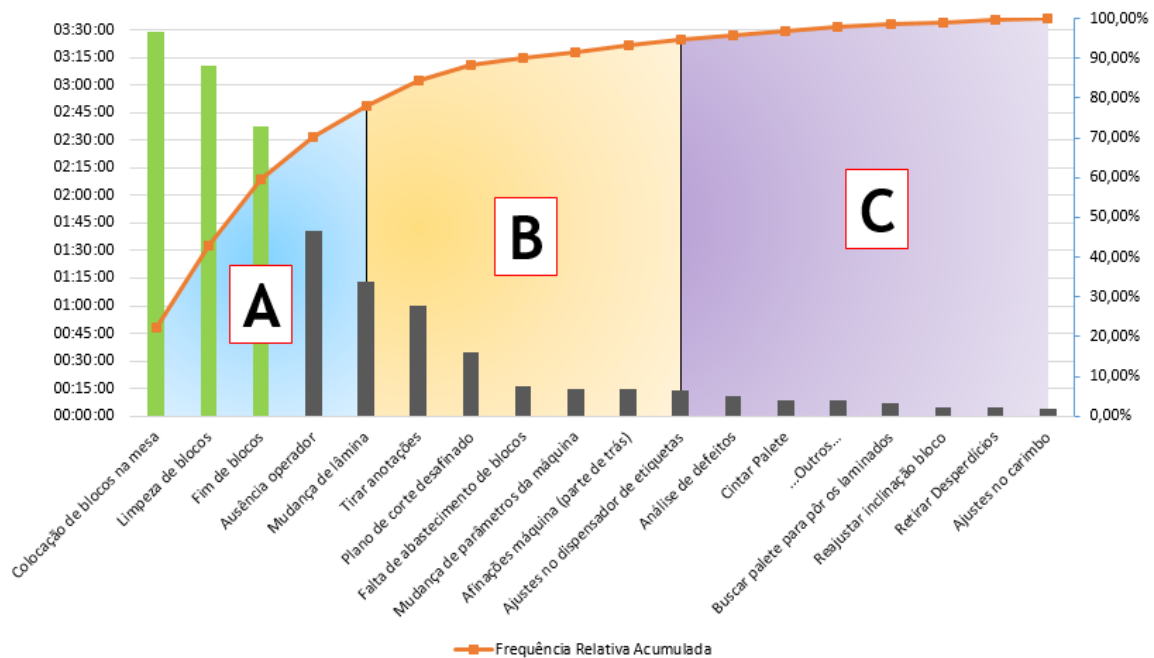


Figura 17 - Diagrama de Pareto relativo aos motivos de paragem da linha

Paragens Devidas ao Setup

Ao realizar esta análise percebeu-se de imediato que o *setup* era o principal responsável pelos tempos improdutivos, sendo que a ele se deviam os três motivos causadores de mais paragens, assinalados a verde na Figura 17. No total, o *setup* era a causa de cerca de 60% das paragens da linha.

Foi calculado o tempo do *setup* médio, tendo em conta os dados recolhidos, e obteve-se o valor de 13 minutos e 41 segundos, com um desvio padrão de 2 minutos e 45 segundos.

Como já foi referido no subcapítulo 3.3.1, o *setup* das laminadoras divide-se em três etapas distintas: colocação dos blocos na mesa, limpeza dos blocos e fim dos blocos. A primeira e terceira etapas são mais ou menos similares para todas as encomendas, ou seja, à partida não há nenhum fator que faça com que estas possam sofrer alguma alteração. Em relação à segunda etapa – limpeza dos blocos – o mesmo já não se verifica, uma vez que a forma como esta se processa varia, dependendo se os blocos a laminar são retificados ou não.

Como também foi referido no subcapítulo 3.3.1, a limpeza dos blocos é diferente consoante estes são retificados ou não. Por esse motivo, ao fazer-se esta análise, a fase de limpeza foi dividida em três categorias diferentes: limpeza de blocos totalmente retificados (BTR), limpeza de blocos parcialmente retificados (BPR) e limpeza de blocos não retificados (BNR). Teoricamente, os blocos que passam pela retificadora deveriam sair todos bem retificados e praticamente sem necessidade de limpeza nas laminadoras, mas tal não acontece. Por esse motivo, através de uma inspeção visual, avaliou-se a qualidade de retificação dos blocos que vinham da retificadora para serem laminados e estes foram divididos em BTR e BPR.

O facto de os blocos não serem bem retificados implica que o processo de limpeza nas laminadoras seja mais demorado e haja mais material desperdiçado. Com esta divisão pretendia-se contabilizar o impacto da qualidade da retificação nos tempos de limpeza.

Assim, foram medidos os tempos de um total de 37 limpezas de blocos e os dados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempos médios de limpezas de blocos

Tipo de Limpeza	Média de tempo de limpeza	Desvio padrão do tempo de limpeza
Limpeza BNR	0:13:34	0:03:01
Limpeza BPR	0:03:56	0:00:39
Limpeza BTR	0:03:45	0:01:14

Pela análise da Tabela 4 conclui-se que entre os BTR e os BPR não existe uma diferença significativa no tempo de limpeza. Era de esperar que um BPR necessitasse de um maior número de “passagens”, na fase de limpeza, que um BTR e, por esse motivo, que a operação de limpeza fosse um pouco mais demorada. A limpeza dos BPR é, de facto, mais demorada mas apenas representa um aumento de cerca de 5% em relação ao tempo de limpeza dos BTR, o que não se considera relevante.

Quando são BNR, o tempo de limpeza sofre um aumento bastante significativo em relação aos BTR, de cerca de 262%. Esta grande diferença no tempo da operação deve-se ao facto de, conforme já foi referido no subcapítulo 3.3.1, ser necessário limpar a face superior do bloco, virá-lo 180°, limpar a face inferior e só posteriormente se pode laminar. Para além disso, como o bloco não sofre qualquer tipo de limpeza prévia na retificadora, é natural que seja necessário realizar mais “passagens” nas laminadoras até estas duas faces adquirirem as condições requeridas.

Paragens Não Devidas ao Setup

Em seguida, excluíram-se as paragens devidas ao *setup*, e analisaram-se as restantes paragens identificadas. Os três motivos responsáveis por mais paragens a seguir ao *setup* são a ausência de operador, a mudança da lâmina da laminadora e o registo de informação por parte do operador. Foram contabilizadas como “ausência de operador” todas as paragens em que se observava que o operador saía da zona da linha, sem se perceber exatamente o que o motivou a tal.

Calculou-se a média de paragens não devidas ao *setup*, que será incluída posteriormente no modelo de previsão do *lead time* de laminagem. Obteve-se um valor médio de paragens de 22,49%, com um desvio padrão de 20,78 pontos percentuais (pp). O elevado valor do desvio padrão, indica que há muita variabilidade no processo e, por esse motivo, o valor médio calculado não traduzirá sempre da forma precisa as paragens da linha. No entanto, esta variabilidade dos tempos de paragem “não *setup*” é imprevisível e, ainda que o desvio padrão seja elevado, esta média servirá como valor de referência para este tipo de paragens.

3.4.3 Recolha dos Tempos de Ciclo - Laminadoras

Em paralelo com a recolha dos tempos improdutivos, foi também realizada a recolha de tempos de ciclo das laminadoras. Durante este período, procurou-se recolher uma amostra considerável destes tempos para, posteriormente, serem utilizados na realização do modelo de previsão do *lead time*, que será apresentado no capítulo 4.

Considerou-se como tempo de ciclo (T_c) o período de tempo desde o momento em que a mesa de uma laminadora inicia o seu movimento de avanço até ao momento em que esta inicia o movimento de avanço seguinte, realizando um ciclo completo. Ao recolher os T_c pretendia-se obter dados para calcular a cadência de produção das laminadoras.

O Tc depende da velocidade que o operador define para a máquina. Para cada referência e espessura a laminar existe um intervalo de valores entre os quais o operador pode definir a velocidade. Este intervalo existe porque muitas vezes é necessário ajustar a velocidade da máquina em função de algumas condicionantes que podem surgir, nomeadamente defeitos do material. Por exemplo, caso se verifique a existência de pedras no granulado dos blocos (um defeito relativamente comum em algumas referências), deve-se reduzir a velocidade de laminação de forma a minimizar os danos que estas possam provocar na lâmina da máquina, bem como possíveis arranhões e marcas no material.

Alguns tempos de ciclo foram recolhidos em simultâneo com a recolha dos tempos improdutivos, outros foram recolhidos posteriormente. Nesta fase de recolha exclusiva de tempos de ciclo pretendia-se, por um lado, aumentar a dimensão da amostra, por outro, centrar a recolha de dados nas referências mais “importantes”, ou seja, aquelas que representam uma percentagem maior no volume de produção total. Recorreu-se, por isso, novamente ao diagrama de Pareto da Figura 15 para fazer essa filtragem de referências.

Seguidamente, para as referências que se concluiu serem as mais relevantes, averiguou-se quais as espessuras a que estas são mais frequentemente laminadas. Recorrendo ao plano de produção semanal, procurou-se identificar quando é que as encomendas com as referências e espessuras pretendidas iriam ser produzidas, de forma a possibilitar a recolha dos respetivos tempos de ciclo.

Recolheu-se um total de 74 tempos de ciclo, que foram organizados numa tabela. Para cada um deles registou-se qual a laminadora em que este foi medido, o turno, a referência e a espessura, conforme se pode observar no cabeçalho da tabela de registo dos tempos de ciclo que se apresenta na Figura 18.

Registo dos Tempos de Ciclo						
Código	Data	Lam	Turno	Ref	Esp	Tciclo

Figura 18 - Cabeçalho da tabela de registo de tempos de ciclo

3.4.4 Planeamento da Produção e Tempos dos Cartões de Laminagem

Na linha H263, o planeamento da produção é feito à semana. Numa primeira fase, as encomendas são distribuídas pelas várias laminadoras, tendo em conta as suas características. Para cada encomenda é criado um cartão de laminagem (Figura 19), que contém informações como a ordem de fabrico, as dimensões dos blocos, a referência, a espessura a laminar, a quantidade de placas e o tempo estimado de laminagem.

Sem	Tipo	Laminagem - Embalagem	B2	1
21	N STD			
OF:		W708791	1000 mm x 500 mm	
Qtd. Placas:		9.216		
Qtd. Caixas:		288		
Qtd. Paletes:		24	5,00	
Cód. Caixa:		CX(F) 19910-G 1035x535x160		
Duração Lam:		10:09:00		

Figura 19 - Cartão de laminagem

Numa fase seguinte, as encomendas são distribuídas pelos vários dias da semana e, em cada dia, é-lhes atribuída uma hora de início. Esta divisão é feita colocando os cartões de laminagem na caixa de nivelamento da respetiva laminadora, conforme se pode observar na Figura 20. Esta caixa está dividida por dias e por horas, e cada cartão é colocado no espaço correspondente à hora prevista para o início da laminagem da encomenda correspondente.



Figura 20 - Caixa de nivelamento da laminadora 001

Para que o planeamento seja adequado é essencial que as previsões dos tempos de laminagem sejam minimamente precisas. Atualmente, verifica-se que as previsões existentes estão muito desfasadas daquilo que é a realidade. Regra geral, as encomendas demoram sempre bastante mais tempo a serem produzidas do que o tempo estimado, indicado nos cartões de laminagem.

É, então, importante perceber de que forma foram obtidos os valores atuais das previsões dos tempos de laminagem. Obtiveram-se estes valores recorrendo a gamas que estão já definidas para os vários produtos, em que o único fator diferenciador entre elas é a espessura a laminar. Na altura em que estas gamas foram criadas, foram feitas algumas medições do tempo que demorava a laminar um certo número de placas de algumas referências, em várias espessuras e, em seguida, extrapolaram-se esses valores para as restantes referências.

3.4.5 Análise do Desperdício Operacional - Laminadoras

Outro objeto de análise foi o material desperdiçado na operação das laminadoras. Pretendia-se quantificar o material desperdiçado na laminagem de uma mesa de blocos, não devido a defeitos, mas todo o desperdício inerente à operação de laminagem, que não depende da qualidade da matéria-prima. Este desperdício operacional tem duas origens bem definidas: material retirado na limpeza dos blocos e fundos (sobras dos blocos após laminagem).

Para realizar esta quantificação procedeu-se de duas formas distintas que serão apresentadas seguidamente.

Cálculo do Desperdício Operacional pelo Peso

O cálculo do desperdício foi realizado através do peso das paletes. O procedimento consistiu em pesar a palete vazia, pesar a palete com os blocos antes de serem laminados e, por fim, pesar a palete com as placas laminadas mais as placas defeituosas. Em seguida, o cálculo do desperdício operacional foi realizado da seguinte forma:

$$\%D_{op} = \frac{(P_{pB} - P_{pP}) * 100}{P_{pB} - P_p} \quad (3.1)$$

Onde:

$\%D_{op}$. é a percentagem de desperdício operacional

P_{pB} . é o peso da palete com os blocos [kg]

P_{pP} . é o peso da palete com as placas laminadas e defeituosas [kg]

P_p . é o peso da palete vazia [kg]

Cálculo do Desperdício Operacional pelo Volume

O cálculo do desperdício foi realizado pelo volume dos blocos e placas laminadas. Foi necessário calcular o volume inicial, que corresponde ao volume total dos blocos que vão ser laminados, e o volume final, que é o volume das placas laminadas mais as placas defeituosas. Foram, então, realizadas medições nos blocos para saber quais as suas dimensões médias. Em relação às placas, o seu comprimento e largura são iguais aos dos blocos e a sua espessura é a que se está a laminar.

É de realçar que a espessura real das placas não corresponde exatamente à espessura de laminagem teórica. Existe um intervalo de valores entre os quais a espessura real pode variar, e o seu valor médio está sempre um pouco abaixo do valor teórico. Embora o valor real seja muito próximo do teórico, quando se pretende saber o volume de um elevado número de placas, esta diferença acentua-se e pode alterar consideravelmente o valor obtido para o volume total das placas. Por esse motivo, utilizou-se sempre a espessura real das placas.

$$V_{inicial} = N_b * c_b * l_b * a_b * 10^{-9}, \quad (3.2)$$

$$V_{final} = e_{real} * c_b * l_b * N_p * 10^{-9}, \quad (3.3)$$

$$\%D_{op} = \frac{(V_{inicial} - V_{final}) * 100}{V_{inicial}} \quad (3.4)$$

Onde:

$V_{inicial}$. é o volume total dos blocos na paleta [m^3]

N_b . é o número de blocos na paleta

c_b . é o comprimento de um bloco da paleta [mm]

l_b . é a largura de um bloco da paleta [mm]

a_b . é a altura de um bloco da paleta [mm]

V_{final} . é o volume total das placas laminadas e defeituosas [m^3]

e_{real} . é a espessura real das placas laminadas [mm]

N_p . é o número de placas laminadas e defeituosas

$\%D_{op}$. é a percentagem de desperdício operacional

Resultados Obtidos

Idealmente, o cálculo do valor do desperdício deveria ter sido feito apenas pela equação que recorre ao peso das paletes, uma vez que esta conduz a resultados mais fidedignos. No entanto, para este cálculo é necessário fazer várias pesagens para cada medição, sendo necessário que uma empilhadora leve as paletes até à zona da balança, as pese e as traga de volta, o que causa alguns constrangimentos na linha e não é muito viável. Por esse motivo, utilizou-se também o cálculo do desperdício recorrendo ao volume, que, apesar de não conduzir a resultados tão exatos, é muito mais fácil de executar.

Realizaram-se 10 medições utilizando o cálculo pelo volume e pelo peso, por forma a poder comparar os resultados. Chegou-se à conclusão que os valores do desperdício operacional calculados pelo peso eram ligeiramente superiores aos calculados pelo volume, cerca de meio ponto percentual. Apesar de não ser uma diferença muito significativa, considerou-se esse erro de 0,5% nas medições realizadas posteriormente utilizando o volume.

Foram realizadas mais 10 medições do desperdício calculadas pelo volume, perfazendo um total de 20. Na Figura 21 apresenta-se o cabeçalho da tabela de registo as medições e respetivos cálculos.

Ref	Data	Cod.	Lam	Esp	Esp	Nº	Comprimento	Largura	Altura	Nº Placas	V. Inicial	V. Final	Desperdício	% Desperdício	% Desperdício
				Real	Blocos		[mm]	[mm]	[mm]		[m³]	[m³]	[m³]		+ Erro 0,5%

Figura 21 - Cabeçalho da tabela de cálculo do desperdício operacional pelo volume

Conclui-se que, em média, o desperdício por mesa é de 3.4% e o desvio padrão de 1,82 pontos percentuais.

3.4.6 Identificação de Potenciais Pontos de Melhoria - Retificadora

As laminadoras foram o foco principal da análise que se realizou na linha, no entanto, realizaram-se também observações na retificadora, de forma a identificar os principais problemas.

Paragem de Blocos à Entrada da Retificadora

Um motivo de paragem que se verificou ser algo frequente foi a paragem dos blocos de cortiça à entrada da retificadora. Isto acontece pelo facto de, por vezes, os blocos estarem com

as extremidades mais “arredondadas”. Quando assim é, o contacto entre o bloco e os cilindros rotativos existentes na máquina, responsáveis por fazer com que o bloco entre na mesma, pode não existir. Neste caso, o bloco permanecerá na entrada, parando o processo produtivo. Na Figura 22 é apresentado um esquema que ilustra o problema relatado.

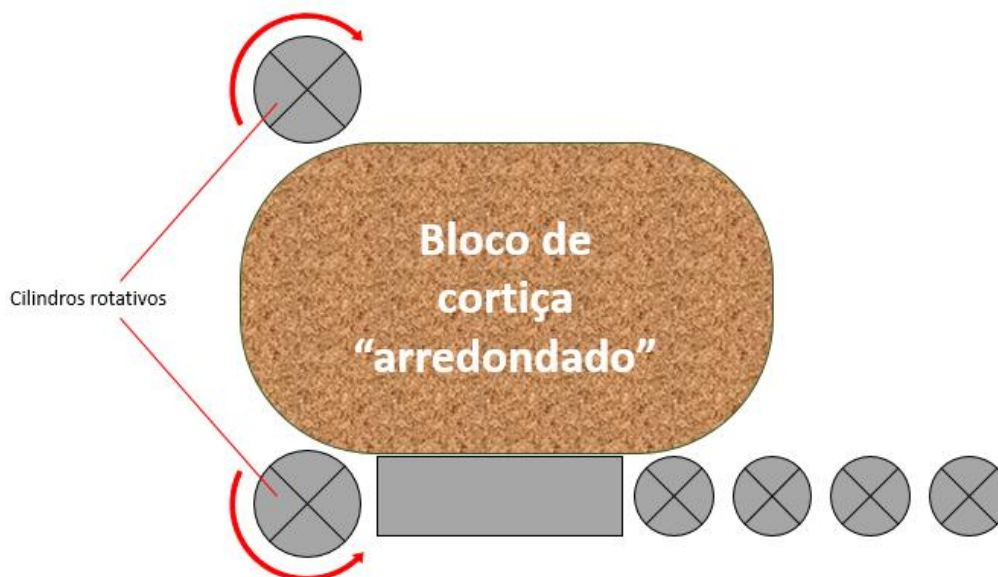


Figura 22 - Esquema representativo da paragem dos blocos na entrada da retificadora

Desalinhamento de Blocos na Paleta

Verificou-se que os blocos ao serem empilhados na paleta, após saírem da retificadora, por vezes, ficavam desalinhados e com espaços entre eles, como ilustrado na Figura 23. Poderia, assim, haver risco de queda de blocos no transporte das paletes.



Figura 23 - Blocos retificados em paleta

Os blocos, após serem retificados, são colocados numa mesa e forçados a cair na paleta por intermédio de um empurrador (Figura 24). Identificou-se que este desalinhamento ocorria porque o tempo de atuação do empurrador não era suficiente, uma vez que os blocos ainda não tinham sido totalmente colocados na paleta e o empurrador já estava a recuar.

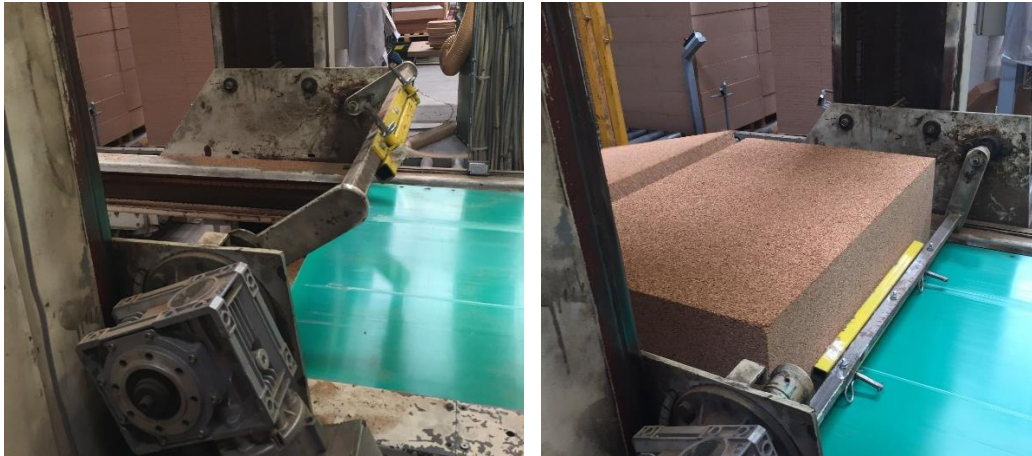


Figura 24 - Empurrador de blocos para a paleta

Tempo Perdido pelo Operador ao ir Buscar Blocos ao Armazém

Durante a observação da linha, constatou-se que o operador da retificadora perdia bastante tempo ao ir buscar blocos ao armazém. Foi-se então analisar o armazém de blocos, com o intuito de perceber o porquê da demora na realização desta tarefa.

Após observação do armazém de blocos, percebeu-se, de imediato, uma série de aspetos que poderiam ser melhorados e que impossibilitavam uma rápida recolha dos blocos por parte do operador da retificadora.

Os blocos eram colocados no armazém sem qualquer tipo de identificação da zona onde se encontravam. Assim, sempre que o operador ia buscar uma determinada referência, não sabia onde esta se encontrava e tinha de andar a percorrer o armazém olhando para as inscrições presentes nos blocos, até encontrar o que pretendia. Para além disso, havia desarrumação, várias referências na mesma fila, a mesma referência podia encontrar-se em várias zonas, havia falta de marcações das filas e os blocos eram colocados no armazém sem um critério definido. Na Figura 25 podem observar-se algumas das situações descritas.



Figura 25 - Desarrumação (esquerda) e várias referências na mesma fila (direita)

Por todos estes motivos, havia uma grande desorganização do armazém, que resultava em tempos improdutivos, sempre que o operador da retificadora ia buscar blocos.

4 Modelo de Previsão do *Lead Time* de Laminagem

No presente capítulo será apresentado o modelo de previsão de *lead time* de laminagem que foi elaborado durante o projeto da dissertação. Este modelo tinha como finalidade prever os tempos de laminagem das encomendas.

A elaboração do modelo pode ser decomposta em quatro etapas principais, presentes na Figura 26.



Figura 26 - Principais etapas da elaboração do modelo de previsão do *lead time* de laminagem

A primeira e segunda etapas foram descritas nos vários subcapítulos do capítulo 3. Alguns dos dados aí recolhidos, como os tempos de ciclo, as espessuras de laminagem, entre outros, foram utilizados para a elaboração do modelo. A terceira e quarta etapas serão apresentadas no presente capítulo.

4.1 Regressão Multivariada com 7 Variáveis Independentes

Dos vários métodos de previsão do LT apresentados no subcapítulo 2.1, utilizou-se um método estatístico – a regressão multivariada. Com este método pretendia-se prever os valores do tempo de ciclo (T_c) que serviriam de base para a criação do modelo.

Para a realização da regressão multivariada, primeiro é necessário definir quais as variáveis a considerar. A variável dependente é o tempo de ciclo, pois é a variável cujo comportamento se pretende prever, em função das várias variáveis independentes. Quanto às variáveis independentes, a sua escolha não é tão imediata, uma vez que, numa fase inicial, poderá não ser óbvio quais as variáveis que contribuem para a variação da variável dependente. Assim, definiu-se um conjunto de variáveis abrangente de forma a que todas as variáveis que pudessem influenciar o T_c fossem contabilizadas:

- Laminadora: Laminadora na qual a encomenda é produzida;
- Turno: Turno no qual a encomenda é produzida;
- Referência: Referência do material;
- Espessura: Espessura das placas que se irá obter após laminagem [mm];

- Densidade: Densidade do material [kg/m^3];
- Tipo de granulado: Tipo de granulado do material;
- Tamanho de grão: Diâmetro médio dos grãos de cortiça do material [mm];

Os valores das quatro primeiras variáveis foram registados na recolha de dados feita previamente. Os valores da densidade, tipo de granulado e tamanho de grão foram recolhidos recorrendo-se a uma base de dados da empresa e variam consoante a referência do material. A variável densidade, expressa em kg/m^3 , corresponde à densidade, ou massa volúmica, dos aglomerados de cortiça, ou seja, dos blocos que chegam à linha e, consequentemente, das placas a que estes dão origem. O tipo de granulado, tal como o nome indica, diz respeito às características do granulado de cortiça que constitui os blocos. É dividido em quatro categorias, tendo em conta essencialmente a densidade dos grãos de cortiça, sendo estas BD (baixa densidade), MD (média densidade), AD (alta densidade) ou LOTE (mistura). A variável tamanho do grão diz respeito à dimensão média do diâmetro dos grãos de cortiça.

Após a recolha de todos estes dados, tinha-se uma amostra de 74 observações e passou-se à realização da análise multivariada, utilizando o *software* estatístico SPSS.

4.1.1 Introdução e Preparação dos Dados

Para realizar a regressão multivariada usando o SPSS, a primeira etapa consistiu na introdução dos dados no programa. Foram introduzidas todas as variáveis referidas anteriormente, com os respetivos valores.

Para cada variável definiu-se qual o seu tipo, sendo que todas as variáveis foram classificadas como variáveis de escala ou variáveis nominais. As variáveis de escala correspondem às variáveis de características mensuráveis, que podem ser medidas numa escala contínua, como é o caso da espessura [mm], tempo de ciclo [s], densidade [kg/m^3] e tamanho de grão [mm]. Já as variáveis nominais correspondem a variáveis sem características quantitativas, mas sim qualitativas, variáveis categóricas, que representam uma classificação, como é o caso da laminadora, turno, referência e tipo de granulado. Na Figura 27 pode observar-se a classificação das variáveis no *software*.

	Nome	Tipo	Largura	Decimais	Rótulo	Valores	Omisso	Colunas	Alinhar	Medida	Papel
1	Cod	Númerico	8	0		Nenhum	Nenhum	5	Centro	Nominal	Nenhum
2	Turno_d	Númerico	8	0		{0, 1T}...	Nenhum	6	Centro	Nominal	Nenhum
3	Ref	Númerico	8	0		Nenhum	Nenhum	5	Centro	Nominal	Nenhum
4	Esp	Númerico	8	1		Nenhum	Nenhum	5	Centro	Escala	Nenhum
5	T_Ciclo	Númerico	8	2		Nenhum	Nenhum	7	Centro	Escala	Nenhum
6	Densidade	Númerico	8	2		Nenhum	Nenhum	9	Centro	Escala	Nenhum
7	Tam_Grao	Númerico	8	2		Nenhum	Nenhum	6	Centro	Escala	Nenhum
8	MD_d	Númerico	8	0		{0, Não MD}...	Nenhum	4	Centro	Nominal	Nenhum
9	AD_d	Númerico	8	0		{0, Não AD}...	Nenhum	4	Centro	Nominal	Nenhum
10	LOTE_d	Númerico	7	0		{0, Não LOT}...	Nenhum	6	Centro	Nominal	Nenhum
11	Lam003_d	Númerico	8	0		{0, Não Lam}...	Nenhum	7	Centro	Nominal	Nenhum
12	Lam007_d	Númerico	8	0		{0, Não Lam}...	Nenhum	7	Centro	Nominal	Nenhum
13	Lam008_d	Númerico	8	0		{0, Não Lam}...	Nenhum	7	Centro	Nominal	Nenhum
14	Lam012_d	Númerico	8	0		{0, Não Lam}...	Nenhum	7	Centro	Nominal	Nenhum

Figura 27 - Classificação das variáveis no *software* SPSS.

Para as variáveis nominais foi necessário codificar os valores que estas podem assumir, fazendo corresponder uma variável *dummy* a cada categoria (estas variáveis estão indicadas com “_d”). Uma variável *dummy* apenas pode assumir o valor 0 ou 1, indicando se determinada categoria da variável que lhe corresponde é satisfeita (valor 1) ou não (valor 0). As variáveis *dummy* criadas para as variáveis laminadora, turno e tipo de granulado foram:

- Laminadora: Lam003_d, Lam007_d, Lam008_d e Lam012_d;
- Turno: Turno_d;
- Tipo de granulado: MD_d, AD_d e LOTE_d;

É importante referir que, se uma variável categórica pode assumir N valores, o número de variáveis *dummy* necessárias para codificar essa variável será N-1.

Após todas as variáveis estarem corretamente introduzidas e definidas no programa, a tabela de dados apresentava o aspeto da Figura 28.

	Cod	Turno_d	Ref	Esp	T_Ciclo	Densidade	Tam_Grao	MD_d	AD_d	LOTE_d	Lam003_d	Lam007_d	Lam008_d	Lam012_d
1	1	1	1054	25,0	58,54	159,00	3,00	0	0	0	0	1	0	0
2	2	1	1053	4,0	30,50	198,00	,75	0	0	0	1	0	0	0
3	3	0	1035	6,0	35,00	248,00	3,00	0	0	0	0	0	1	0
4	4	0	1052	19,0	59,97	232,00	1,00	1	0	0	0	0	0	1
5	5	0	1049	6,0	38,79	280,00	2,00	0	0	0	0	0	1	0
6	6	0	1026	10,0	39,60	255,00	4,00	0	0	1	0	1	0	0
7	7	0	1030	1,0	27,21	255,00	4,00	0	0	1	0	0	0	0
8	8	0	1026	4,0	27,83	255,00	4,00	0	0	1	1	0	0	0
9	9	0	1054	20,0	41,83	159,00	3,00	0	0	0	0	1	0	0
10	10	0	1008	12,7	34,60	216,00	2,50	0	0	0	0	0	1	0
11	11	0	1026	4,0	36,24	255,00	4,00	0	0	1	1	0	0	0
12	12	0	1052	,8	25,36	232,00	1,00	1	0	0	0	0	0	0
13	13	1	1054	20,0	50,09	159,00	3,00	0	0	0	0	1	0	0
14	14	1	1026	5,0	36,72	255,00	4,00	0	0	1	1	0	0	0
15	15	1	1052	6,0	35,62	232,00	1,00	1	0	0	0	0	0	1
16	16	1	1052	0	27,26	188,00	75	0	0	0	0	0	0	0

Figura 28 - Folha de visualização de dados no SPSS

4.1.2 Verificação dos Pressupostos e Realização da Regressão

No subcapítulo 2.2.1 são dados a conhecer os pressupostos que devem ser verificados e cumpridos quando se realiza uma análise multivariada. No presente subcapítulo será explicitado todo o processo que foi realizado para a verificação dos mesmos.

Os dois primeiros pressupostos podem ser verificados antes da realização da regressão, no entanto, há outros cuja verificação é feita à posteriori. Adotou-se então uma lógica inversa, ou seja, embora os pressupostos devessem ser verificados antes de se realizar a regressão, só realizando a regressão e gerando alguns *outputs* se poderia verificar a maioria desses mesmos pressupostos. Assim, verificou-se o cumprimento dos dois primeiros pressupostos, realizou-se a regressão e depois verificou-se os pressupostos restantes, tendo em mente que a não verificação de algum deles invalidaria a regressão.

Ao realizar a regressão, escolheu-se o método de seleção de variáveis “Enter”, que é o método predefinido, em que todas as variáveis independentes selecionadas são introduzidas na regressão num único passo. Criaram-se também 5 variáveis auxiliares que foram utilizadas na verificação dos pressupostos. Estas variáveis, presentes na Figura 29, contêm: os valores previstos não padronizados (PRE_1), os resíduos *studentizados* (SRE_1), os resíduos *studentizados* apagados (SDR_1), os valores da Distância de Cook (COO_1) e os valores de alavancagem (LEV_1).






 PRE_1	 SRE_1	 SDR_1	 COO_1	 LEV_1
52,28942	1,52203	1,53930	,04979	,20469
30,10261	,09509	,09430	,00016	,17686
36,17219	-,27394	-,27181	,00103	,13773
51,20779	2,38923	2,49067	,26537	,36299
36,65196	,49777	,49463	,00323	,13131
39,20361	,08953	,08878	,00006	,07774
28,39742	-,27073	-,26863	,00069	,09480
31,95853	-,94625	-,94542	,00920	,10410
43,52051	-,39628	-,39348	,00224	,14291
15,12999	-,27294	-,28819	,25256	,29322

Figura 29 - Variáveis auxiliares criadas

Verificação dos Pressupostos

- 1. As variáveis dependentes são medidas numa escala contínua.**
- 2. Há duas ou mais variáveis independentes, sendo que estas podem ser contínuas ou categóricas.**

Estes dois pressupostos são os primeiros que devem ser verificados e, caso não sejam cumpridos, a análise multivariada não será um teste estatístico adequado para analisar os dados.

No caso em questão, o tempo de ciclo (T_c), que é uma variável contínua, constitui a única variável dependente. Como já foi mencionado no subcapítulo 4.1.1, as variáveis independentes são 7 no total e todas são contínuas (definidas no programa como variáveis do tipo escala) ou categóricas (definidas no programa como variáveis do tipo nominal). Assim, os dois primeiros pressupostos foram cumpridos.

3. Há independência nas observações.

O pressuposto de independência de observações numa regressão multivariada implica que não haja correlação de 1ª ordem entre as observações, ou seja, observações adjacentes (especialmente os seus erros) não devem estar correlacionadas.

Na recolha de dados teve-se o cuidado de fazer observações em diferentes momentos do dia, em diferentes laminadoras, sem seguir nenhum tipo de padrão, para que a amostra recolhida fosse o mais aleatória possível. A única restrição imposta, principalmente na fase intermédia e final da recolha, foi de que as observações se centrassem mais nas referências que tinham sido definidas como tipo A e B na análise de Pareto realizada anteriormente.

No entanto, para confirmar que este pressuposto efetivamente era cumprido, realizou-se o teste de Durbin-Watson. Este teste é utilizado para detetar uma possível correlação na recolha de dados. O valor do teste pode variar de 0 a 4, sendo que para que não haja correlação este deve assumir o valor de aproximadamente 2. Como se pode observar na Figura 30, o valor obtido foi de 2,096, logo verificou-se este pressuposto.

Sumarização do modelo^b

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa	Durbin-Watson
1	,869 ^a	,755	,706	4,64519	2,096

Figura 30 - Teste de Durbin-Watson

4. Há uma relação linear entre (a) a variável dependente e cada uma das variáveis independentes e entre (b) a variável dependente e as variáveis independentes coletivamente.

A verificação do pressuposto de linearidade na regressão multivariada foi dividida em duas partes, uma destinada a verificar a condição (a) e outra a condição (b).

Para verificar a condição (a) utilizaram-se regressões parciais entre cada variável independente e a variável dependente, sendo que as variáveis categóricas podem ser ignoradas. Após se realizarem estas regressões, procurou-se perceber se existia uma relação linear entre os pontos, ou seja, se os pontos apresentavam uma distribuição similar a alguma das representadas na Figura 31.

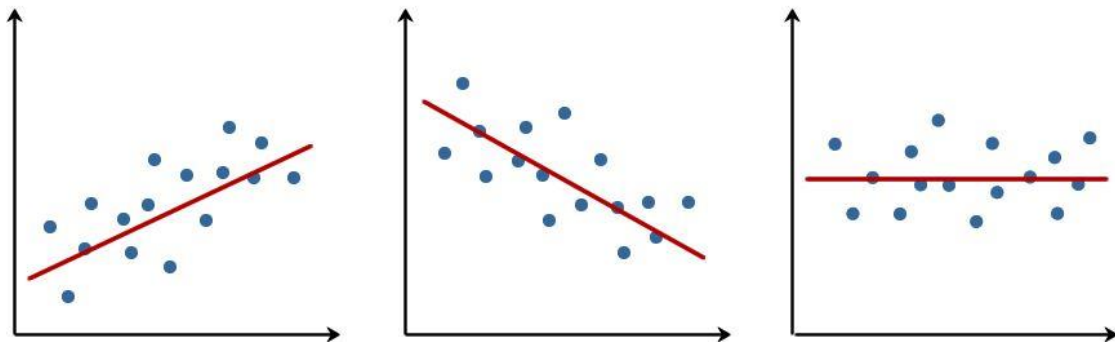


Figura 31 - Exemplos de relações lineares (LaerdStatistics 2015)

Após a análise das regressões geradas para cada uma das variáveis independentes, conclui-se que todas seguem uma distribuição aproximadamente igual a alguma das presentes na Figura 31, e por esse motivo a condição (a) é satisfeita.

A título de exemplo, a Figura 32 apresenta o gráfico da regressão parcial entre uma variável independente, a espessura, e a variável dependente, o tempo de ciclo.

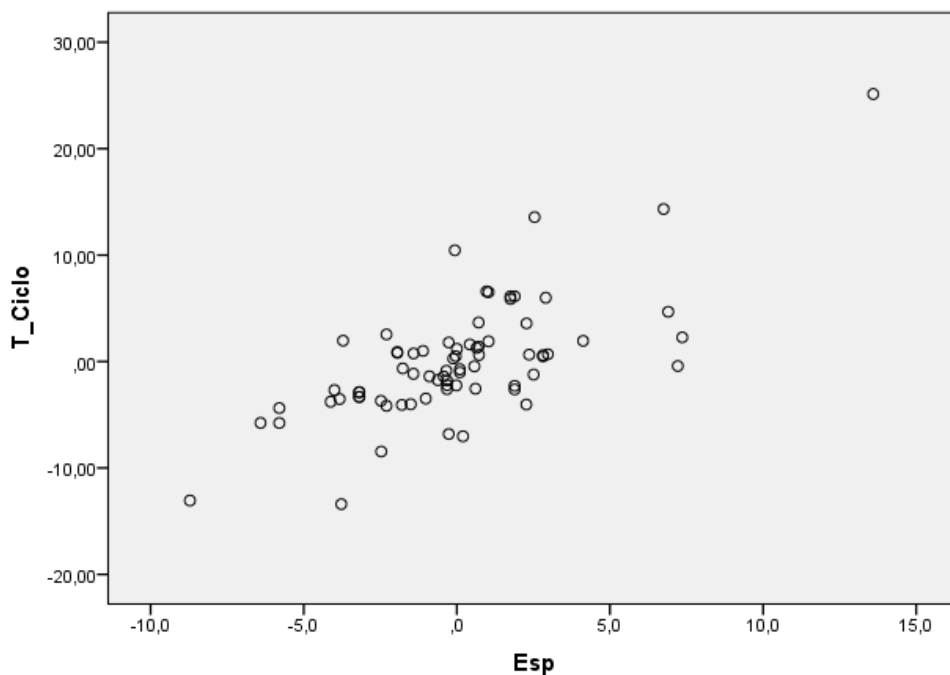


Figura 32 - Regressão parcial entre o tempo de ciclo e a espessura

Para verificar a condição (b) realizou-se o *scatterplot* presente na Figura 33, com os resíduos *studentizados* (SRE_1) e com os valores previstos não padronizados (PRE_1). Se os resíduos tiverem uma distribuição aproximadamente horizontal, conclui-se que é provável que a relação entre a variável dependente e as variáveis independentes, coletivamente, seja linear.

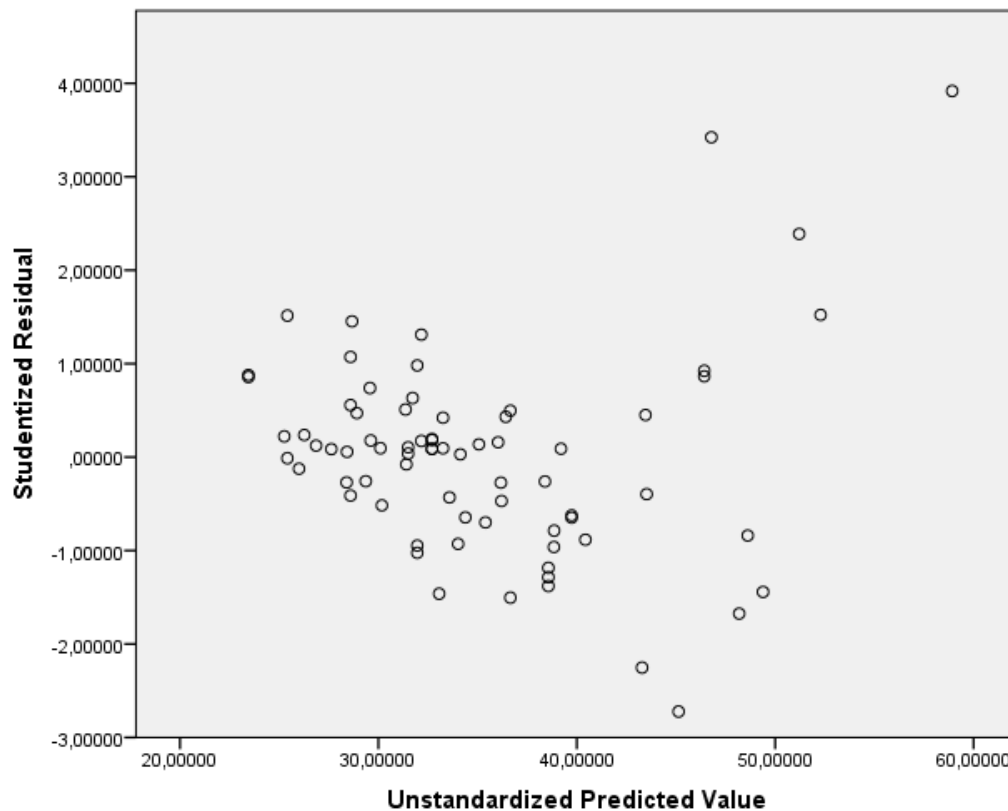


Figura 33 - *Scatterplot* dos resíduos *studentizados* e valores previstos não padronizados

Pela análise da Figura 33 não é evidente que a distribuição dos resíduos seja horizontal. Por esse motivo, a validação desta condição ficou pendente.

5. Os dados revelam ter homocedasticidade de resíduos.

Para verificar este pressuposto, utilizou-se o *scatterplot* presente na Figura 33. Para que haja homocedasticidade, a dispersão dos resíduos não deverá aumentar nem diminuir à medida que se percorre o eixo com os valores previstos não padronizados. Observando o gráfico, parece haver uma maior dispersão dos resíduos à medida que os valores previstos aumentam. Por esse motivo este pressuposto não foi verificado.

6. Os dados não revelam multicolinearidade.

Para realizar a verificação deste pressuposto recorreu-se à tabela de correlações gerada ao realizar a regressão e presente no Anexo A. Para que o pressuposto não fosse violado, todos os valores de correlação deveriam ser inferiores a 0,7. Analisou-se os valores presentes na tabela e verificou-se que, efetivamente, todas as variáveis independentes cumpriam este requisito.

Para além disso, a validação do pressuposto também está dependente da verificação de que os valores da tolerância presentes nas estatísticas de colinearidade são superiores a 0,1. Tal como se pode observar na Figura 34, esta condição é satisfeita.

	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	95,0% Intervalo de Confiança para B		Correlações			Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro Padrão				Limite inferior	Limite superior	Ordem zero	Parcial	Parte	Tolerância	VIF
(Constante)	125,463	63,765		1,968	,054	-2,087	253,013					
Turno_d	2,902	1,338	,150	2,169	,034	,226	5,579	,100	,270	,139	,857	1,166
Ref	-,108	,060	-,188	-1,794	,078	-,229	,012	-,160	-,226	-,115	,371	2,694
Esp	1,173	,161	,800	7,293	,000	,851	1,495	,636	,685	,466	,340	2,943
Densidade	,059	,011	,480	5,192	,000	,036	,082	,276	,557	,332	,479	2,088
Tam_Grao	-,111	1,041	-,017	-,107	,915	-2,195	1,972	,010	-,014	-,007	,165	6,067
MD_d	-,511	2,080	-,026	-,246	,807	-4,672	3,650	-,142	-,032	-,016	,368	2,720
AD_d	1,271	2,916	,044	,436	,664	-4,561	7,103	,395	,056	,028	,401	2,493
LOTE_d	-1,166	2,505	-,064	-,465	,643	-6,175	3,844	-,151	-,060	-,030	,218	4,580
Lam003_d	-,392	1,749	-,019	-,224	,823	-3,892	3,107	-,310	-,029	-,014	,592	1,690
Lam007_d	-,187	2,355	-,009	-,079	,937	-4,897	4,523	,330	-,010	-,005	,298	3,351
Lam008_d	1,586	2,036	,067	,779	,439	-2,486	5,658	,176	,100	,050	,557	1,794
Lam012_d	4,443	1,938	,180	2,293	,025	,567	8,318	,133	,284	,147	,666	1,502

Figura 34 - Estatísticas de colinearidade

7. Não existência de pontos outliers.

Para verificar a existência de *outliers*, recorreu-se às variáveis auxiliares SDR_1, COO_1 e LEV_1.

Primeiramente, verificou-se se algum dos valores da variável SDR_1 era superior a ± 3 desvios padrão, caso isso acontecesse significaria que a observação correspondente seria um potencial *outlier*. Ordenou-se os dados por ordem decrescente de valor da variável SDR_1, conforme ilustrado na Figura 35, e verificou-se, para as observações com valores máximos e mínimos desta variável, se o seu valor absoluto era superior a 3. Conclui-se que as 2 observações com valores de SDR_1 mais elevados (com os códigos 35 e 54) excediam esse valor. Por esse motivo, estas observações poderiam constituir *outliers*, logo dever-se-ia prestar-lhes especial atenção nas verificações seguintes.

	Cod	PRE_1	SRE_1	SDR_1
1	35	58,91855	3,91818	4,50412
2	54	46,78386	3,42261	3,78333
3	4	51,20779	2,38923	2,49067
4	1	52,28942	1,52203	1,53930
5	28	25,41127	1,51441	1,53129
6	68	28,66756	1,45336	1,46725
7	69	32,16320	1,31110	1,31916
8	55	28,59638	1,07186	1,07322
9	11	31,95853	,98131	,98100
10	18	46,42293	0,74418	0,72204

Figura 35 - Dados ordenados por ordem decrescente de SDR_1

Em seguida, verificou-se se existiam observações com elevado valor de alavancagem. Os valores de alavancagem menores que 0,2 são considerados como seguros, de 0,2 a 0,5 são considerados como arriscados e superiores a 0,5 são considerados perigosos.

Para fazer esta avaliação, ordenou-se os dados por ordem decrescente do valor da variável LEV_1. Como se pode observar na Figura 36, constatou-se que nenhuma observação possuía um valor de alavancagem considerado perigoso, ou seja, superior a 0,5. No entanto, várias observações possuíam valores considerados arriscados (entre 0,2 e 0,5) e mereciam alguma atenção, em especial a observação 35, cujo valor estava bastante próximo de 0,5.

	Cod	PRE_1	SRE_1	SDR_1	COO_1	LEV_1
1	35	58,91855	3,91818	4,50412	1,20251	,49083
2	4	51,20779	2,38923	2,49067	,26537	,36299
3	22	34,01549	-,92902	-,92794	,03597	,33771
4	54	46,78386	3,42261	3,78333	,41485	,30155
5	10	45,12999	-2,72291	-2,88419	,25256	,29322
6	24	48,18350	-1,67388	-1,70004	,09255	,28672
7	30	43,28997	-2,25289	-2,33498	,16425	,28242
8	70	35,06562	,13688	,13576	,00052	,25328
9	26	29,57298	,73879	,73596	,01495	,24888
10	21	38,84746	0,67220	0,61600	0,24880	,24532

Figura 36 - Dados ordenados por ordem decrescente de LEV_1

O passo seguinte consistiu na verificação do nível de influência dos vários pontos. Recorreu-se à variável COO_1, que armazena os valores da Distância de Cook para cada observação. Esta distância trata-se de uma medida de influência. De forma análoga à realizada nos casos anteriores, ordenou-se os dados por ordem decrescente do valor da variável COO_1, para identificar quais as observações em que esta variável assumia um valor mais elevado. Observações com um valor superior a 1 poderão ser problemáticas. Como se pode constatar na Figura 37, a observação com o código 35 tem um valor da variável COO_1 superior a 1.

	Cod	PRE_1	SRE_1	SDR_1	COO_1
1	35	58,91855	3,91818	4,50412	1,20251
2	54	46,78386	3,42261	3,78333	,41485
3	4	51,20779	2,38923	2,49067	,26537
4	10	45,12999	-2,72291	-2,88419	,25256
5	30	43,28997	-2,25289	-2,33498	,16425
6	24	48,18350	-1,67388	-1,70004	,09255
7	1	52,28942	1,52203	1,53930	,04979
8	39	49,38700	-1,44260	-1,45600	,04386
9	50	33,06060	-1,46209	-1,47639	,04206
10	68	28,66756	1,45336	1,46725	0,1102

Figura 37 - Dados ordenados por ordem decrescente de COO_1

Após todas estas verificações, conclui-se, por via estatística, que as observações com os códigos 35 e 54 são *outliers*, e por esse motivo não deverão ser consideradas na regressão.

A conclusão a que se chegou, de que estas duas observações eram *outliers*, pode ser explicada pelo facto de as referências em questão terem algumas particularidades. A referência B10, presente na observação 35, tem uma densidade bastante elevada comparativamente com as restantes referências, motivo pelo qual tem a particularidade de a sua laminagem ter de ser realizada com o material quente (para que a força de corte seja menor). Este é um fator singular, que não se verifica em nenhuma das outras referências observadas, portanto é natural que introduza discrepâncias nos parâmetros medidos nesta observação face à tendência verificada nas observações restantes. Em relação à referência presente na observação 54, que é uma referência destinada a ser utilizada em artigos de calçado, tem também algumas características que a diferenciam da grande maioria das referências observadas. No entanto, neste caso, o motivo de o seu tempo de ciclo estar fora da tendência poderá estar relacionado com facto de o material ter alguns defeitos e, por esse motivo, ter havido necessidade de o laminar mais lentamente que o habitual. Para além disso, apenas se conseguiu realizar uma única observação para cada uma destas referências, uma vez que são referências com muito baixa utilização e são laminadas poucas vezes.

8. Os resíduos (erros) são normalmente distribuídos.

Para verificar este pressuposto, recorreu-se ao histograma dos resíduos padronizados presente na Figura 38. Como se pode observar, a distribuição dos resíduos é aproximadamente normal.

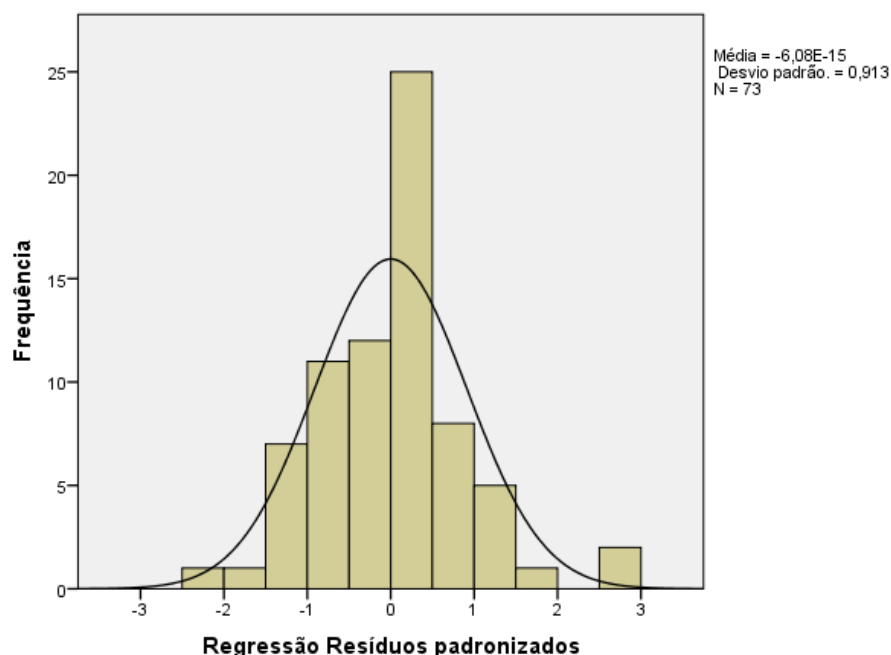


Figura 38 - Histograma de resíduos padronizados

Para confirmar esta conclusão, recorreu-se ao *Plot P-P* normal de regressão dos resíduos padronizados. Se os resíduos forem normalmente distribuídos, os pontos estarão aproximadamente alinhados ao longo da linha diagonal. Observando a Figura 39, constata-se que, apesar de os pontos não estarem perfeitamente alinhados com a linha, o seu alinhamento é suficientemente próximo para indicar que os resíduos se aproximam de uma distribuição normal. A regressão multivariada é robusta o suficiente para “permitir” alguns desvios da normal, por isso este resultado é perfeitamente aceitável e não viola o pressuposto da normalidade de resíduos.

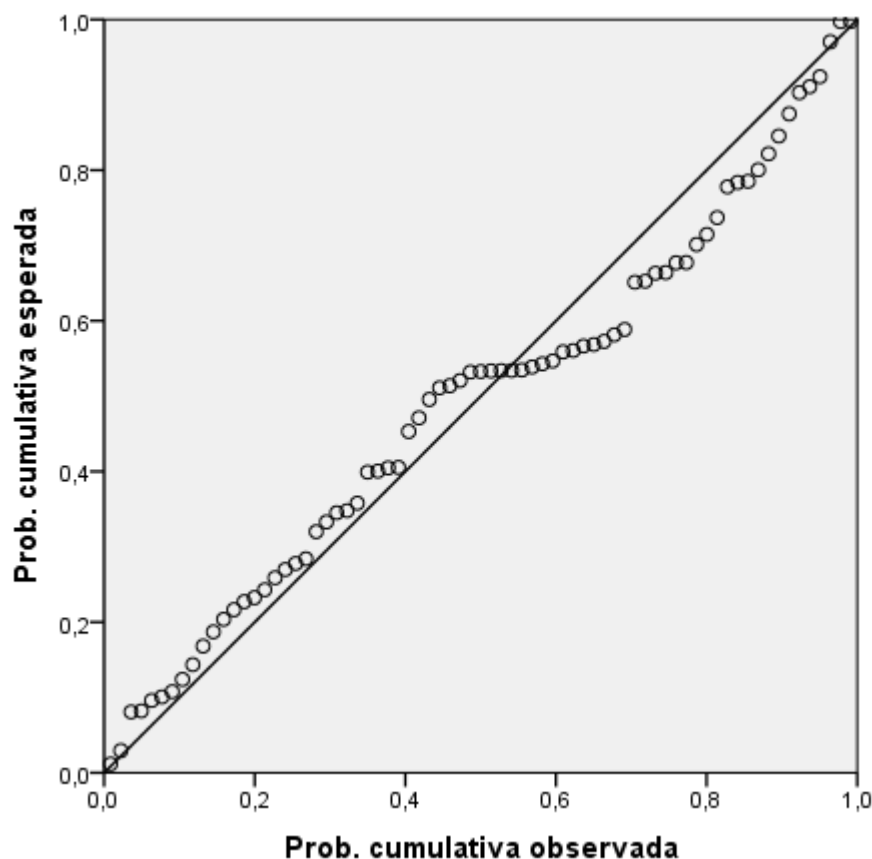


Figura 39 - Plot P-P normal de regressão de resíduos padronizados

Resumo da Análise dos Pressupostos

Após se realizar todo o procedimento de verificação de pressupostos descrito anteriormente, os resultados podem ser resumidos da seguinte forma:

- A verificação do pressuposto 4 (b) deixou algumas dúvidas;
- O pressuposto 5 não foi verificado;
- Conclui-se que as observações com o código 35 e 54 eram *outliers*;

Nesta fase, teve-se em consideração que a existência destes *outliers* poderia ser o motivo pelo qual a validação do pressuposto 4 (b) não era evidente e o pressuposto 5 não era verificado. Assim sendo, retiraram-se as observações 35 e 54 dos dados, fez-se uma nova regressão e em seguida procedeu-se a uma nova verificação de todos os pressupostos.

Verificação dos Pressupostos Após Eliminação dos *Outliers*

Seguindo um procedimento idêntico ao descrito anteriormente, a verificação dos pressupostos foi feita novamente.

Os pressupostos 1, 2, 3 e 4 (a) foram validados novamente. Em relação ao pressuposto 4 (b), anteriormente não era evidente que a distribuição dos resíduos fosse horizontal, após a eliminação dos *outliers* essa tendência já se tornou mais clara, conforme se pode observar na Figura 40.

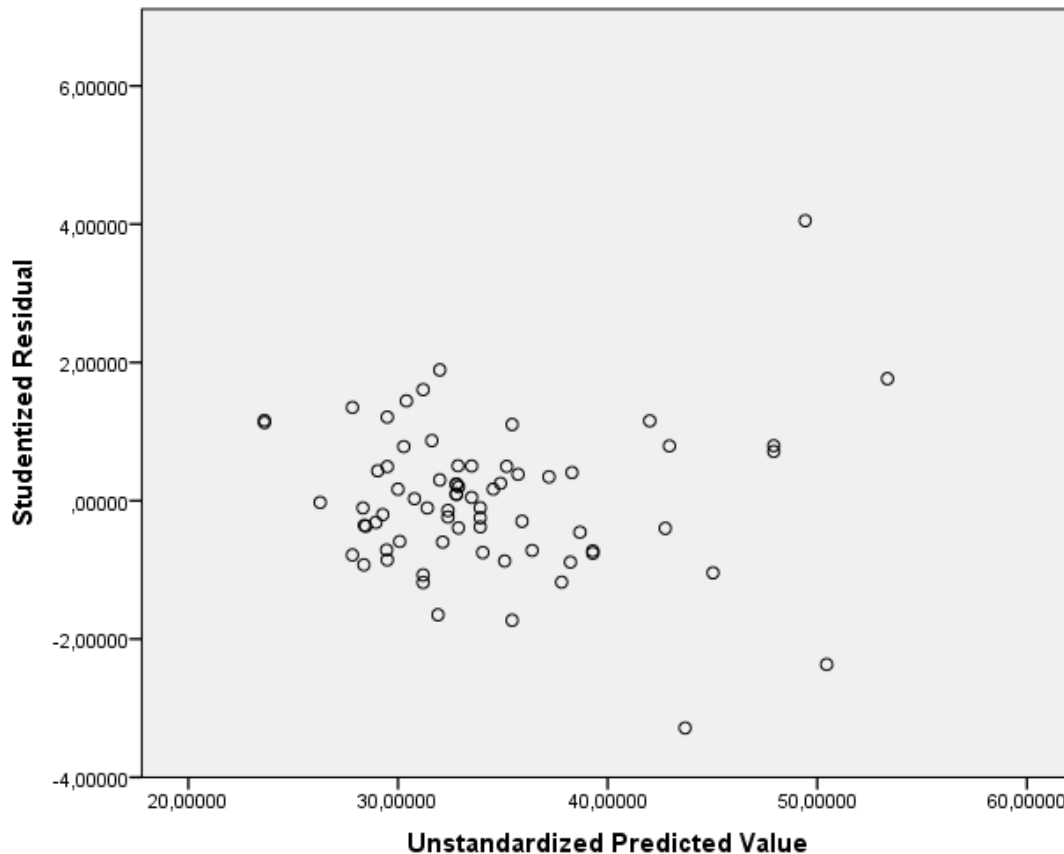


Figura 40 - *Scatterplot* dos resíduos *studentizados* e valores previstos não padronizados após eliminação dos *outliers*

Em relação ao pressuposto 5, este não tinha sido verificado, uma vez que a dispersão dos resíduos parecia aumentar à medida que os valores previstos não padronizados aumentavam. Com a eliminação das observações 35 e 54, este aumento da dispersão foi atenuado, como é visível na Figura 40, sendo que se pôde considerar o pressuposto 5 como validado. Os pressupostos 6, 7 e 8 foram validados em seguida.

Desta forma, todos os pressupostos se encontravam agora verificados e procedeu-se à análise dos resultados obtidos.

4.1.3 Análise dos Resultados Obtidos

Após a realização da regressão, há uma série de *outputs* gerados pelo programa que devem ser analisados e interpretados para averiguar a validade da regressão e compreender o seu significado. Esta análise dos resultados pode ser dividida em duas fases: a primeira, consistiu em verificar se a regressão multivariada realizada se adequava aos dados e, a segunda, em perceber os coeficientes gerados na regressão.

Verificação da Adequabilidade da Regressão aos Dados

Recorrendo à tabela de resumo do modelo gerada pelo *software* SPSS, interpretaram-se alguns coeficientes que forneceram informações no sentido de perceber se a regressão se adequa aos dados existentes.

O primeiro elemento analisado foi o **coeficiente de correlação múltipla (R)**. Este coeficiente mede a força da associação linear entre as variáveis. O seu valor pode variar entre 0 e 1, sendo

que quanto mais elevado for, mais forte será a associação linear. Conforme se pode observar na Figura 41, o valor deste coeficiente para a regressão realizada foi de $R=0,896$, o que indica que há um forte nível de associação linear entre as variáveis.

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa
1	,896 ^a	,802	,761	3,34159

Figura 41 - Quadro resumo da regressão

O elemento analisado em seguida foi a **variância total explicada (R^2)**, que mede de 0 a 1, a proporção da variância da variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes. Como se pode observar também na Figura 41, $R^2=0,802$. Isto significa que todas as variáveis coletivamente explicam 80,2% da variabilidade da variável dependente, um efeito de grande escala de acordo com Cohen et al. (2013).

Seguidamente, foi-se verificar a **significância estatística** da regressão. Para isso, recorreu-se à tabela ANOVA presente na Figura 42.

ANOVA ^a						
Modelo		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
1	Regressão	2627,030	12	218,919	19,605	,000 ^b
	Resíduo	647,641	58	11,166		
	Total	3274,671	70			

Figura 42 - Tabela ANOVA

Para que o resultado seja estatisticamente significativo, o valor de p , indicado na coluna “Sig.” deverá ser menor que 0,05. Observando a tabela, constata-se que o valor de “Sig.” indicado é de 0,000. Na realidade, isto significa que $p < 0,0005$, ou seja, tem uma ordem de grandeza bastante inferior a 0,05, logo estamos perante um resultado estatisticamente significativo.

Interpretação dos Coeficientes Gerados na Regressão

Em seguida, foi-se avaliar a significância estatística de cada uma das variáveis. Para isso, recorreu-se à tabela de coeficientes presente na Figura 43 e analisou-se os coeficientes da coluna “Sig.”.

Coeficientes ^a												
	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	95,0% Intervalo de Confiança para B		Correlações			Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro Padrão				Limite inferior	Limite superior	Ordem zero	Parcial	Parte	Tolerância	VIF
(Constante)	84,18	48,145		1,75	,086	-12,189	180,558					
Turno_d	2,898	,966	,189	3,00	,004	,964	4,831	,204	,366	,175	,860	1,16
Ref	-,062	,046	-,131	-1,37	,176	-,154	,029	,021	-,177	-,080	,374	2,68
Esp	1,085	,117	,938	9,30	,000	,851	1,318	,831	,774	,543	,335	2,99
Densidade	,029	,010	,228	2,77	,008	,008	,049	-,129	,342	,162	,505	1,98
Tam_Grao	,512	,754	,097	,679	,500	-,997	2,021	,137	,089	,040	,167	5,99
MD_d	1,278	1,674	,082	,812	,420	-1,873	4,428	-,108	,106	,047	,335	2,98
AD_d	-,815	2,160	-,031	-,377	,707	-5,138	3,509	,122	-,049	-,022	,515	1,94
LOTE_d	-,877	1,802	-,060	-,487	,628	-4,485	2,731	-,105	-,064	-,028	,221	4,52
Lam003_d	-1,759	1,272	-,106	-1,38	,172	-4,306	,787	-,329	-,179	-,081	,583	1,71
Lam007_d	-1,166	1,699	-,073	-,686	,495	-4,568	2,236	,492	-,090	-,040	,299	3,34
Lam008_d	1,182	1,465	,061	,807	,423	-1,751	4,116	,066	,105	,047	,605	1,65
Lam012_d	1,856	1,495	,091	1,24	,219	-1,136	4,849	,071	,161	,073	,636	1,57

Figura 43 - Tabela de coeficientes

Para que as variáveis tenham significância estatística e devam ser consideradas na regressão, uma vez mais, o seu valor de “Sig.” deve ser menor que 0,05 ($p < 0,05$). Observando a Figura 43, consta-se que esta condição apenas é satisfeita pelas variáveis turno, espessura e densidade, com $p = 0,004$, $p < 0,0005$ e $p = 0,008$, respetivamente. Assim, conclui-se que todas as outras variáveis (laminadora, referência, tipo de granulado e tamanho de grão) não têm significância estatística, ou seja, não explicam a variação verificada na variável dependente e, por esse motivo, podem ser retiradas da análise.

4.2 Regressão Multivariada com 2 Variáveis Independentes

Como mencionado no subcapítulo anterior, conclui-se então que só as variáveis turno, espessura e densidade tinham significância estatística para a análise. Chegou-se a esta conclusão porque, estas variáveis satisfaziam a condição $p < 0,05$, correspondente a um nível de significância estatística de 5%.

Embora o turno tenha influência na variação do tempo de ciclo, este não foi incluído na segunda regressão realizada e, conseqüentemente, também não integrou o modelo de previsão.

Esta decisão foi tomada uma vez que o turno não é tido em conta no planeamento da produção. Como já foi explicado no subcapítulo 3.4.4, quando é feito o planeamento, as encomendas são distribuídas pelos vários dias e horas, mas esta distribuição não contempla o turno em que as encomendas serão produzidas, até porque muitas vezes a mesma encomenda é produzida ao longo de vários turnos. Assim sendo, incluir o turno no modelo iria torná-lo mais complexo e mais difícil de aplicar, sem grande vantagem em fazê-lo. Portanto, após discussão com o responsável da empresa, decidiu-se excluir esta variável.

Após a conclusão de que só as variáveis espessura e densidade deveriam ser consideradas na análise, realizou-se uma nova regressão, em que estas eram as únicas variáveis independentes.

4.2.1 Análise dos Resultados Obtidos

O **coeficiente de correlação múltipla (R)**, que na regressão anterior assumia um valor de $R=0,896$, sofreu, tal como era de esperar, uma ligeira redução, passando a ter o valor de $R=0,861$ (Figura 44). O mesmo se verificou em relação ao valor da **variância total explicada (R^2)**, que passou de $R^2=0,802$ para $R^2=0,741$ (Figura 44). Assim, a regressão explica 74,1% da variabilidade da variável dependente.

Embora este valor seja bastante bom, há ainda 25,9% da variância do tempo de ciclo que a regressão não consegue explicar. Isto deve-se essencialmente ao facto de, como já foi referido no subcapítulo 3.4.3, haver a possibilidade de ajuste da velocidade de laminagem por parte do operador. Assim sendo, poderá acontecer que haja, por exemplo, duas observações em que a densidade seja a mesma, a espessura de laminagem seja também igual, no entanto, o tempo de ciclo medido seja diferente. A regressão não consegue explicar esta variação, sendo que este poderá ser o principal motivo de o R^2 não ser ainda mais elevado.

O facto de estes valores terem sofrido apenas uma ligeira redução veio confirmar que as variáveis removidas tinham efetivamente um impacto muito reduzido no tempo de ciclo.

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa
1	,861 ^a	,741	,733	3,53101

Figura 44 - Quadro resumo da nova regressão

Quanto à **significância estatística** da regressão, como se pode observar na Figura 45, o valor de “Sig.” manteve-se inferior a 0,0005 ($p < 0,0005$), logo o resultado é estatisticamente significativo.

ANOVA ^a						
Modelo		Soma dos Quadrados	gl	Quadrado Médio	F	Sig.
1	Regressão	2426,847	2	1213,423	97,323	,000 ^b
	Resíduo	847,824	68	12,468		
	Total	3274,671	70			

Figura 45 - Tabela Anova da nova regressão

Passou-se, em seguida, à análise da tabela de coeficientes presente na Figura 46. Analisando a coluna “Sig.” da tabela, as duas variáveis apresentam um valor $p < 0,0005$, logo têm significância estatística, como era de esperar.

Coeficientes ^a												
Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Sig.	95,0% Intervalo de Confiança para B		Correlações			Estatísticas de colinearidade	
	B	Erro Padrão				Limite inferior	Limite superior	Ordem zero	Parcial	Parte	Tolerância	VIF
1 (Constante)	20,614	2,280		9,042	,000	16,065	25,163					
Esp	1,076	,078	,930	13,795	,000	,920	1,231	,831	,858	,851	,837	1,2
Densidade	,031	,008	,247	3,658	,000	,014	,048	-,129	,406	,226	,837	1,2

Figura 46 - Tabela de coeficientes da nova regressão

A equação gerada pela regressão terá a seguinte estrutura:

$$T_{ciclo} = b_0 + (b_1 * Esp) + (b_2 * Densidade) \quad (4.1)$$

Onde:

b_0 . é uma constante

b_1 . é o coeficiente de declive para a variável espessura

b_2 . é o coeficiente de declive para a variável densidade

Substituindo os valores das constantes b_0 , b_1 e b_2 obtém-se uma equação que permite estimar o valor do tempo de ciclo em função das outras variáveis. Os valores destas constantes são retirados da coluna “B” da tabela de coeficientes presente na Figura 46. Assim, tem-se $b_0 = 20,614$, $b_1 = 1,076$ e $b_2 = 0,031$. Substituindo na equação presente em (4.1), obtém-se a equação final para o tempo de ciclo:

$$T_{ciclo} = 20,614 + (1,076 * Esp) + (0,031 * Densidade) \quad (4.2)$$

Interpretação dos Coeficientes

Estes coeficientes representam a alteração que irá ocorrer na variável dependente, o tempo de ciclo, por cada unidade que se altere nas variáveis independentes, a espessura e a densidade. Considerando a variável espessura, o seu coeficiente é de 1,076, isto significa que se a espessura aumentar 1 mm, o tempo de ciclo irá aumentar 1,076 s. Já em relação à variável densidade, se esta aumentar 1 kg/m³, o aumento do tempo de ciclo será de 0,031 s. Assim, estes coeficientes fornecem informação que permite, de forma rápida e direta, quantificar a alteração do valor do tempo de ciclo provocada pela variação unitária da espessura ou da densidade.

4.3 Modelo em Excel

4.3.1 Apresentação e Explicação do Modelo

Uma vez realizada a regressão múltipla e obtida a equação que fornece o valor do tempo de ciclo em função da espessura e da densidade, passou-se à elaboração do modelo de previsão do *lead time* em Excel.

A Figura 47 apresenta a configuração final do modelo. As colunas com cabeçalho verde correspondem aos *inputs*, e as colunas com cabeçalho laranja e roxo correspondem aos *outputs*.

INPUTS								OUTPUTS			
C	D	F	G	H	I	J	K	AA	AB	AC	AD
Encomenda	Ordem	Ref	Nº Placas	Esp	Comp.	Largura	Altura	Tempo Final com % de paragens	Nº Turnos - com % de paragens	Tempo Final com OEE	Nº Turnos - com OEE
0145893003	W710736	B20	960	5,00	1000	500	210	1:14:54	0,1742	1:08:18	0,1588
0151564002	W710107	B47	378	2,00	940	640	250	0:24:06	0,0560	0:21:59	0,0511
0151569001	W709276	B48	12480	4,00	1000	500	210	13:47:42	1,9249	12:34:47	1,7553
0151634001	W709303	B22	5600	6,00	915	610	250	9:08:11	1,2749	8:19:54	1,1626
0151718001	W709544	B46	840	5,00	940	640	250	1:16:14	0,1773	1:09:32	0,1617
0151751003	W709550	B47	830	1,80	940	640	250	0:51:47	0,1204	0:47:13	0,1098
0151758001	W709577	B36	750	1,70	1000	500	210	0:40:47	0,0948	0:37:11	0,0865
0151758003	W709578	B46	180	3,00	915	610	250	0:13:17	0,0309	0:12:07	0,0282
0151771001	W709613	B22	4320	2,60	915	610	250	5:03:18	0,7053	4:36:35	0,6432
0151771002	W709614	B22	2700	4,00	915	610	250	3:40:48	0,5135	3:21:21	0,4682
0151771003	W709615	B22	2400	6,00	915	610	250	3:54:56	0,5464	3:34:15	0,4982
0151815001	W709815	B46	100	8,00	915	610	250	0:11:36	0,0270	0:10:35	0,0246

Figura 47 - Configuração do modelo de previsão do *lead time* de laminagem

O modelo recorre a uma folha Excel que contém os dados relativos às encomendas semanais e, de forma automática, preenche as colunas dos *inputs*. Estas colunas contêm informações relativas às encomendas, como a ordem de fabrico, a referência, quantidade e espessura das placas a laminar e as dimensões dos blocos.

Utilizando estes *inputs*, o programa gera quatro *outputs*. Para isso, o modelo realiza uma série de cálculos intermédios até obter o valor final da previsão. Estes cálculos são realizados em colunas ocultas, presentes na Figura 48, que serão apresentadas seguidamente.

M	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Z
Linha	Dens.	T. Ciclo	Esp.	Nº Blocos	Placas p/ Bloco	Placas Int p/ Bloco	Placas p/ Mesa	Tempo 1 mesa [s]	Tempo 1 mesa	Tempo 1 mesa + setup	Tempo para Nº Total de Placas
BL3	255	33,899	4,9	15	40,28571	40	600	1355,96	0:22:36	0:36:17	0:58:03
BL1	198	28,904	1,9	12	123,6842	123	1476	3555,192	0:59:15	1:12:56	0:18:41
BL3	159	29,847	3,9	15	50,61538	50	750	1492,35	0:24:52	0:38:33	10:41:34
BL1	227	34,107	5,85	12	40,17094	40	480	1364,28	0:22:44	0:36:25	7:04:55
BL1	232	33,186	4,9	12	47,95918	47	564	1559,742	0:26:00	0:39:41	0:59:06
BL1	198	28,689	1,75	12	134,2857	134	1608	3844,2992	1:04:04	1:17:45	0:40:08
BL3	277	31,03	1,65	15	119,6364	119	1785	3692,5938	1:01:33	1:15:14	0:31:36
BL1	232	31,034	2,9	12	81,03448	81	972	2513,754	0:41:54	0:55:35	0:10:18
BL1	227	30,449	2,5	12	94	94	1128	2862,1684	0:47:42	1:01:23	3:55:06
BL1	227	31,955	3,9	12	60,25641	60	720	1917,3	0:31:57	0:45:38	2:51:09
BL1	227	34,107	5,85	12	40,17094	40	480	1364,28	0:22:44	0:36:25	3:02:06
BL1	232	36,414	7,85	12	29,93631	29	348	1056,006	0:17:36	0:31:17	0:08:50

Figura 48 - Colunas com cálculos intermédios do modelo de previsão do *lead time* de laminagem

- A coluna “M” recorre às dimensões dos blocos presentes nos *inputs* e define a linha de onde os blocos são provenientes, linha BL1, BL2, ou BL3.
- A coluna “O” apresenta o valor da densidade para a referência correspondente.
- Na coluna “P” é calculado o tempo de ciclo, recorrendo à equação dada pela regressão e presente em (4.2).

- A coluna “Q” apresenta o valor real médio da espessura de laminagem. Esta correção no valor da espessura já foi explicada anteriormente em 3.4.5.
- Na coluna “R”, tendo em conta a linha de onde são provenientes os blocos e seguindo as normas existentes, é apresentado o número de blocos que são carregados em cada mesa. Caso a linha de origem seja BL1 ou BL2, este valor é de 12 blocos, caso seja BL3 é de 15 blocos.
- A coluna “S” recorre à altura dos blocos e à espessura real e calcula o número de placas que serão obtidas por bloco. É tido em consideração no cálculo que existe um desperdício médio de 5,9% (2,5% devido a defeitos e 3,4% desperdício operacional).
- A coluna “T” arredonda, por defeito, à unidade o valor obtido na coluna “S”, indicando assim o número de placas “inteiras” por bloco.
- A coluna “U” apresenta o número de placas obtidas em cada mesa laminada, utilizando para os cálculos os valores das colunas “R” e “T”.
- A coluna “W” corresponde ao tempo de laminagem de uma mesa. Para o cálculo, utilizou-se os valores da colunas “P” e “T”, sendo que o número de ciclos necessários para laminar uma mesa corresponde ao número de placas inteiras por bloco. Multiplicando o número de ciclos pelo tempo de ciclo, obtém-se o tempo de laminagem de uma mesa.
- A coluna “X” apresenta o tempo de laminagem de uma mesa mais o tempo de *setup*. Este foi adicionado ao valor presente na coluna “W”, uma vez que cada mesa necessita de um *setup*. O valor adicionado como tempo de *setup* corresponde ao valor médio obtido nas observações realizadas previamente que é de 13 minutos e 41 segundos (Figura 49).
- A coluna “Z” apresenta o tempo de laminagem do número total de placas da encomenda, introduzido nos *inputs* (as únicas paragens contempladas nesta fase são as devidas ao *setup*).

Média da % de paragens/hora s/ SETUP	22,49%	T. Setup médio	00:13:41	T. trabalho/turno	07:10:00
Desv.Pad da % de paragens/hora s/ SETUP	20,78 pp	Desv.Pad T. Setup	00:02:45		
OEE	85%				

Figura 49 - Constantes utilizadas no modelo de previsão do *lead time* de laminagem

É importante lembrar que o tempo de paragem devido ao *setup* já figura no valor presente na coluna “Z”. No entanto, os tempos improdutivos devidos a outros motivos, contabilizados no subcapítulo 3.4.2, ainda não foram tidos em consideração.

Com base no valor presente na coluna “Z”, são gerados os *outputs* apresentados na Figura 47. Estes *outputs* correspondem a duas previsões distintas do *lead time* total de laminagem de cada encomenda e ao número de turnos necessários para a produzir.

A primeira previsão, intitulada “Tempo final com % de paragens”, corresponde ao tempo previsto de laminagem considerando uma média de tempos de paragem extra *setup* obtida pelas observações realizadas anteriormente na linha. Como se pode observar na Figura 49, esta média tem o valor de 22,49%.

Já o valor presente na coluna intitulada “Tempo final com OEE”, corresponde à previsão do tempo de laminagem utilizando o OEE da linha, que constava nos registos da empresa. O seu valor é de 85%, como se pode observar na Figura 49.

Em suma, embora o modelo apresente estas duas previsões (presentes na Figura 47), a previsão final, e a qual deve ser considerada, é a apresentada na coluna “Tempo final com % de paragens”. A previsão apresentada em “Tempo final com OEE” tem apenas um intuito informativo.

No Anexo B encontra-se um documento que foi criado para a empresa com as instruções de utilização do modelo.

4.3.2 Resultados Obtidos

Após a conclusão do modelo de previsão do *lead time* de laminagem, procedeu-se ao teste do mesmo, com vista à obtenção de resultados. Pretendia-se, essencialmente, comparar uma série de tempos reais de laminagem com as previsões geradas pelo modelo e também com as previsões já existentes, para comparar os respetivos erros. Desta forma, verificar-se-ia se o modelo melhorava efetivamente a precisão das previsões e quantificar-se-ia essa melhoria.

Para esta comparação utilizou-se uma amostra aleatória de 10 encomendas, relativas à semana de 22/05/2017 a 26/05/2017. Na Figura 50 apresenta-se a comparação de resultados, que será explicada em seguida.

Na coluna “I” da Figura 50 encontram-se os tempos reais de laminagem das encomendas, obtidos através da consulta das declarações de produção referentes à semana em questão. Em seguida, foram consultadas as previsões já existentes nos cartões de laminagem para essas encomendas (coluna “J”) e calculados os respetivos erros (coluna “K”). Por fim, as encomendas foram introduzidas no modelo e foram geradas as respetivas previsões (coluna “L”), bem como os seus erros (coluna “M”).

Em todas as encomendas testadas verificou-se uma redução do erro de previsão dos tempos do modelo, face aos tempos já existentes. Na coluna “N” é apresentada, para cada encomenda, a redução do erro e, na zona inferior, a redução média do erro relativa às 10 encomendas.

A	B	C	D	E	I	J	K	L	M	N
Encomenda	Ordem	Ref	Nº Placas	Esp	Tempo Real de Laminagem	Previsão Existente nos Cartões	Erro de Previsão do Tempo nos Cartões	Tempo Previsto pelo Modelo	Erro de Previsão do Tempo do Modelo	Redução do Erro
0152174001	W710791	B20	1300	2,00	1:20:00	1:04:00	20,00%	1:27:00	8,74%	56,30%
0151771002	W709614	B22	2700	4,00	4:10:00	2:40:00	36,00%	3:40:48	11,68%	67,55%
0151751007	W710094	B47	11250	0,80	10:05:00	7:37:00	24,46%	10:09:29	0,74%	96,97%
0152279001	W711014	B46	400	1,50	0:30:00	0:18:00	40,00%	0:24:43	17,61%	55,99%
0152074008	W710604	B47	1275	4,00	4:35:00	2:22:00	48,36%	3:11:58	30,19%	37,57%
0151751008	W710095	B47	300	5,00	0:30:00	0:19:00	36,67%	0:26:40	11,13%	69,66%
0152042001	W710426	B46	1500	1,00	2:20:00	1:01:00	56,43%	1:26:34	38,17%	32,36%
0152042002	W710427	B46	2500	1,20	4:10:00	1:43:00	58,80%	2:28:22	40,65%	30,86%
0151721008	W709498	B22	1400	6,00	2:20:00	1:37:00	30,71%	2:17:03	2,11%	93,13%
0151721001	W709491	B22	3000	6,00	4:25:00	3:28:00	21,51%	4:53:40	10,82%	49,70%
MAPE:							37,29%		17,18%	

Figura 50 - Comparação das previsões do modelo com as previsões já existentes e com os tempos reais

Da observação da Figura 50 concluiu-se que o MAPE das previsões existentes nos cartões é de 37,29%. Em relação às previsões dadas pelo modelo, o MAPE tem o valor de 17,18%. Constata-se então que, utilizando as previsões do modelo, o MAPE sofre uma redução de 53,92% face às previsões utilizadas anteriormente.

5 Melhorias Adicionais

Com vista à redução dos tempos de paragem da linha, são apresentadas, no presente capítulo, várias propostas de melhoria. Todas as melhorias apresentadas foram aprovadas pela empresa e, salvo uma exceção, a sua implementação está a decorrer no imediato, ou será para breve.

5.1 Alteração do manipulador de colocação de blocos na mesa

Na análise realizada à linha, no subcapítulo 3.4.2, conclui-se que o motivo responsável por mais tempos de paragem na linha é a colocação dos blocos na mesa. Com vista à redução deste tempo improdutivo propôs-se uma alteração no manipulador utilizado para colocar os blocos na mesa.

Como mencionado em 3.3.1, com o manipulador atual os blocos são colocados um a um na mesa. A alteração proposta consistiu na substituição das patelas circulares responsáveis por estabelecer o contacto entre o manipulador e o bloco, por patelas retangulares. Com este novo sistema seria possível carregar dois blocos de uma vez e, dessa forma, esperava-se uma redução de cerca de 45% do tempo desta operação. Assim, o tempo de *setup* passaria de 13 minutos e 41 segundos para 11 minutos e 13 segundos, correspondendo a uma redução de 18,09%, conseguindo-se um aumento da produtividade.

Na Figura 51 pode observar-se o sistema atual e o modelo feito em *SolidWorks* do sistema proposto.



Figura 51 - Sistema atual (esquerda) e sistema proposto (direita)

Em seguida, foi criado um protótipo para que o sistema pudesse ser testado. O protótipo criado não foi exatamente igual ao proposto, em vez de duas patelas retangulares, consistiu em duas barras horizontais com patelas circulares nas extremidades. O sistema testado pode ser observado na Figura 52.

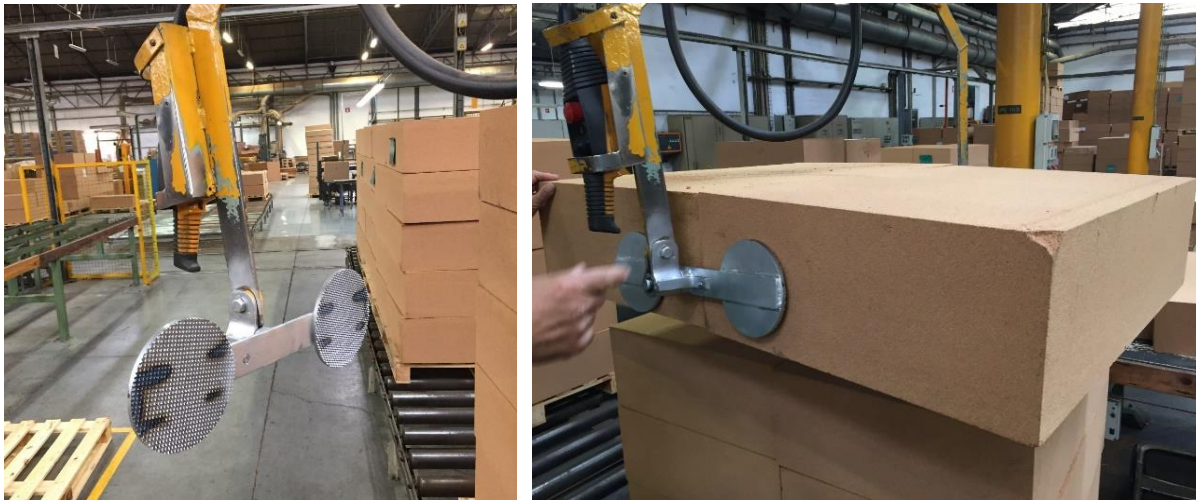


Figura 52 - Sistema testado

Após o teste, conclui-se que, apesar de poder efetivamente possibilitar um aumento da produtividade por redução do tempo de carregamento da mesa, esta alteração exigia um maior esforço físico por parte dos operadores, devido ao aumento de peso da carga transportada.

Para além disso, o novo sistema não era tão fácil de manobrar, embora se pense que este aspeto se agravou pelo facto de o sistema testado não ser igual ao proposto. Assim sendo, a implementação desta melhoria ficou pendente e não ocorrerá no imediato.

5.2 Calibração do tempo de atuação do empurrador de blocos à saída da retificadora

Esta melhoria surgiu no seguimento da melhoria de alteração do manipulador de blocos, apresentada no subcapítulo anterior (5.1). Para que o manipulador pudesse transportar 2 blocos de uma só vez, estes deveriam estar o mais encostados possível na paleta, de forma a garantir que ficariam bem seguros no transporte e que não haveria o risco de queda.

Conforme foi apresentado no subcapítulo 3.4.6, quando os blocos saem da retificadora e são colocados numa paleta, estes ficam muitas vezes desalinhados e com espaços entre eles. Assim, com o objetivo de minorar ou até eliminar este problema, alterou-se o programa informático da máquina e prolongou-se o tempo de atuação empurrador. Desta forma, o empurrador passou a recuar apenas quando os blocos já estavam totalmente em repouso na paleta. É de referir que, uma vez que o empurrador ficava parado após colocar os blocos na paleta, este aumento do seu tempo de atuação não prejudicou em nada a produtividade na retificadora.

Na Figura 53 pode observar-se os blocos na paleta antes e depois da calibração do tempo do atuador.



Figura 53 - Blocos retificados em palete: antes (esquerda) e depois (direita) da calibração do tempo de atuação do empurrador

5.3 Novo *Layout* do Armazém de Blocos

Com vista à redução do tempo que o operador da retificadora perdia a ir buscar blocos ao armazém foi proposta uma reorganização do mesmo, com um novo *layout*.

A proposta consistiu essencialmente nas seguintes alterações:

- Fazer marcações das filas;
- Atribuir zonas específicas para as diferentes dimensões de blocos – métricas ou inglesas;
- Atribuir zonas específicas para as diferentes linhas de origem dos blocos – BL1, BL2 ou BL3;
- Permitir mobilidade de referências de acordo com as necessidades do momento;
- Criar um mapa que contenha a localização de todas as referências do armazém;

Para a elaboração deste novo *layout* do armazém, primeiro, fez-se um registo do estado atual do mesmo, para perceber as quantidades de cada referência existentes nesse momento.

Em seguida, recorreu-se à planta do armazém presente no Anexo C e foram feitas as medições que aí se podem observar.

O passo seguinte foi definir as dimensões das filas destinadas às referências métricas e inglesas, tendo por base as dimensões das respetivas paletes, como se pode observar na Figura 54.

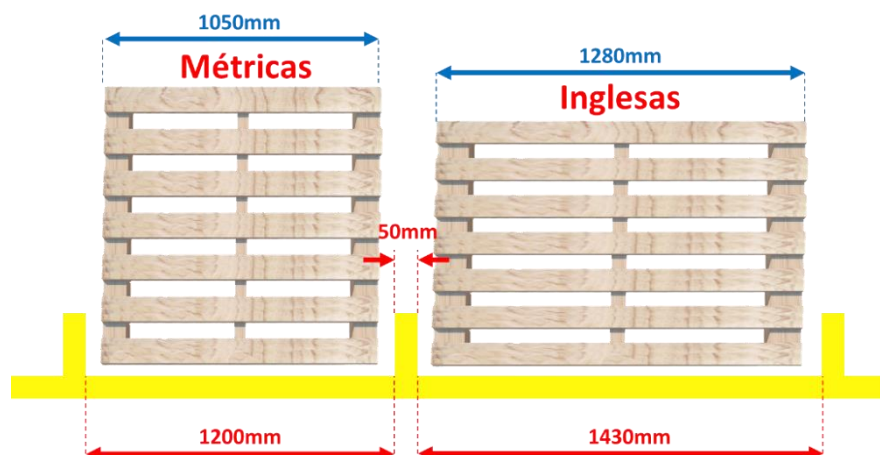


Figura 54 - Dimensões atribuídas às filas

Por fim, elaborou-se o novo *layout*, que se encontra na Figura 55 e em maior detalhe no Anexo D.

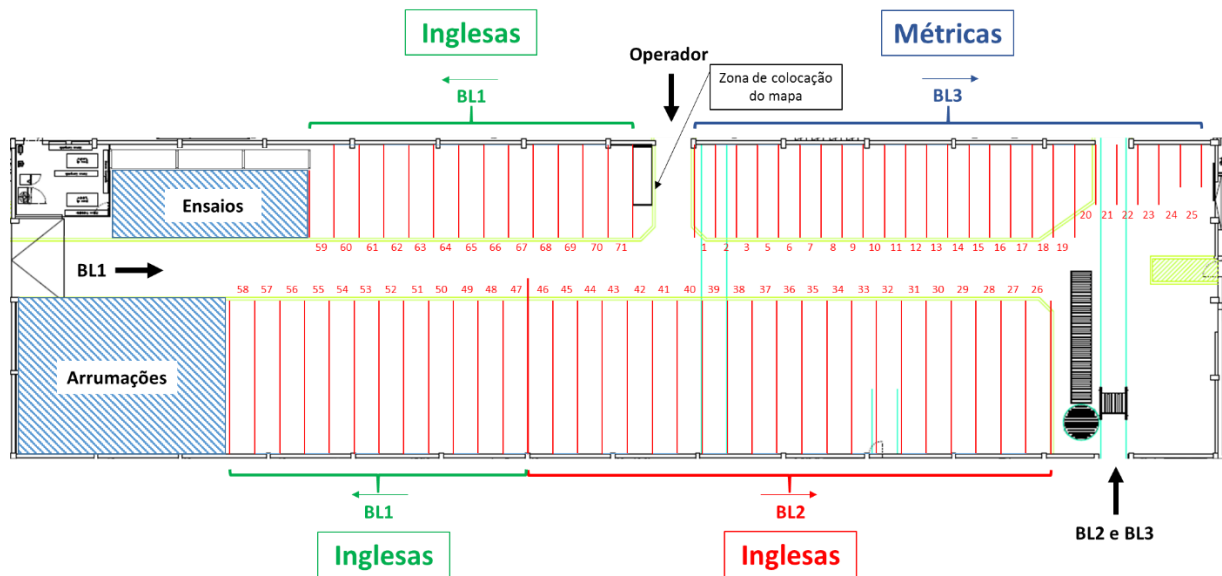


Figura 55 - Novo *layout* para o armazém de blocos

Como se pode observar na Figura 55, o *layout* encontra-se dividido em 3 zonas. Uma delas, destinada a referências de dimensões métricas, que são sempre provenientes da linha BL3, outra destinada a referências inglesas, provenientes da linha BL1, e a terceira destinada também a referências inglesas, mas estas provenientes do BL2. Desta forma, o operador, consoante o tipo de referência que pretender, já saberá a zona em que esta se encontrará armazenada.

As setas presentes junto às indicações das linhas (BL1, BL2 ou BL3) indicam o sentido em que as referências devem ser colocadas, tendo em conta a sua rotatividade. Por outras palavras, as setas apontam da referência com mais rotação para a referência com menos rotação, em cada zona. O operador que traz os blocos deve seguir, sempre que possível, o sentido indicado pelas setas ao colocar referências nas filas. O sentido das setas foi definido desta forma para que as referências que o operador da retificadora vai buscar mais vezes ao armazém, as referências com maior rotação, estejam mais próximas da porta de entrada. Desta forma reduz-se a distância percorrida pelo operador e, conseqüentemente, o tempo desta operação. Teve-se ainda o cuidado de definir as zonas referentes ao BL1, BL2 e BL3 perto das portas por onde é trazido cada tipo de bloco.

As setas pretas indicam as portas de entrada do operador e por onde são trazidos os vários tipos de blocos.

No Anexo E está presente um documento que foi criado para a empresa, com as normas que devem ser cumpridas para que o novo *layout* proposto funcione conforme é esperado.

5.4 Colocação de um sensor na retificadora para medir a altura dos blocos

Um dos problemas presentes na retificadora, identificado em 3.4.6, foi a paragem dos blocos na entrada da máquina. Conforme foi explicado, esta paragem ocorre pelo facto de por vezes os blocos estarem “arredondados” nas extremidades, impossibilitando o contacto entre estes e os cilindros rotativos da máquina.

No sentido de eliminar este problema, propôs-se uma melhoria que consiste em colocar um sensor nesse ponto da retificadora, com a função de medir a altura dos blocos. A informação recolhida pelo sensor seria depois integrada no programa informático da máquina e a altura dos cilindros rotativos seria ajustada em função da altura dos blocos (Figura 56). Desta forma, garante-se que exista o contacto entre os cilindros e os blocos e eliminar-se-ão estas paragens.

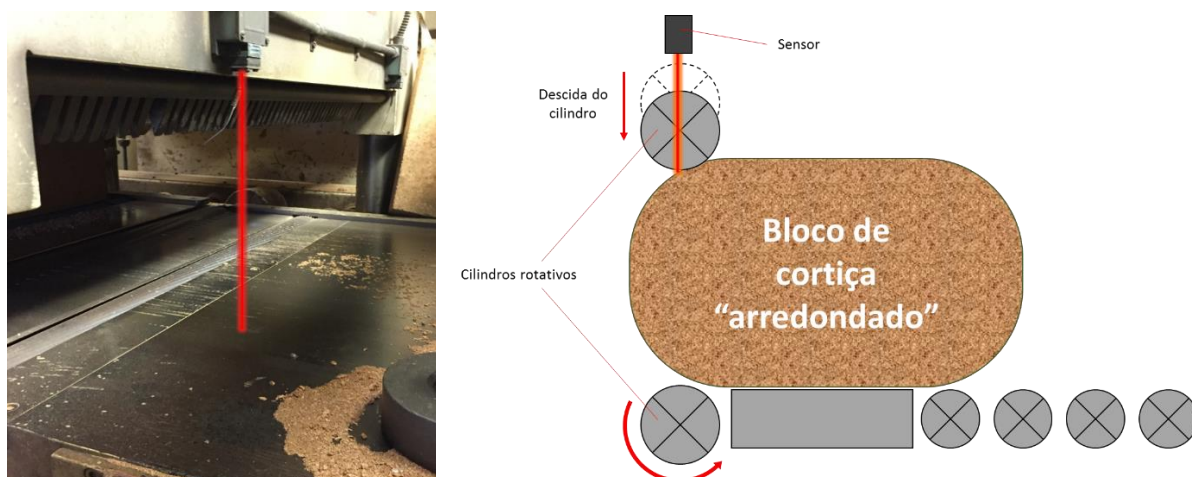


Figura 56 - Sensor proposto (esquerda) e esquema de funcionamento (direita)

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Concluída a presente dissertação, verificou-se que os objetivos previamente definidos foram atingidos. Adotando uma mentalidade de melhoria contínua, tentou-se desenvolver um trabalho que permitisse trazer à empresa ferramentas de fácil implementação e baixo custo, de forma a poderem ser utilizadas a curto prazo.

A análise realizada à linha permitiu identificar e quantificar os motivos responsáveis pela maioria dos tempos improdutivos da mesma, que condicionam seriamente a sua produtividade. Identificou-se que o *setup* é o principal motivo de origem de paragens na linha e fez-se a decomposição do mesmo, caracterizando as várias fases que o constituem.

Após a realização da análise multivariada e toda a análise dos seus *outputs*, há várias conclusões que se podem retirar. Em primeiro lugar, provou-se, com uma base estatística sólida, que a espessura não é a única variável com influência no processo, como estava a ser tido em conta anteriormente. A densidade é uma variável igualmente influente, cuja inclusão no processo de cálculo não pode ser descartada. Conclui-se, ainda, que o turno tem também alguma influência no *lead time* de laminagem, apesar de não ter sido considerado no modelo pelas razões explicitadas anteriormente. Este facto poderá revelar eventuais diferenças produtivas por parte dos operários dos diferentes turnos.

Utilizando as previsões dadas pelo modelo, em detrimento das previsões existentes previamente, o erro médio de previsão passou dos 37,29% para os 17,18%, o que corresponde a uma redução de 53,92%. Assim, tem-se agora um conhecimento bastante mais profundo e real dos *lead times* de laminagem, que possibilitará um planeamento da produção mais facilitado, adequado e fiabilizado. Se articulado com as restantes áreas, este conhecimento permitirá que os compromissos assumidos com os clientes, relativamente aos tempos de entrega das encomendas, sejam mais realistas e, consequentemente, se aumente o nível de serviço da empresa.

Para além disso, comparando as previsões dadas pelo modelo, utilizando a média de paragens medida nas observações, com as previsões que o modelo também gerava utilizando o OEE, observa-se que estas segundas previsões são menos corretas. Isto demonstra que o OEE considerado pela empresa para a linha deverá ser reavaliado, uma vez que o seu valor atual poderá não refletir a realidade da linha.

A implementação do novo *layout* do armazém de blocos iria iniciar-se aquando do término da presente dissertação. Esta área da empresa passará a estar organizada e com uma disposição que minora as deslocações dos operadores e o tempo perdido na busca das referências. Isto será conseguido pela forma como foi definido o armazenamento dos blocos, dividido por zonas atendendo às suas dimensões, e ordenado de forma a garantir que as referências com maior rotação estejam em locais de mais rápido acesso.

Após ter sido testada, a alteração ao manipulador de colocação dos blocos na mesa ficou com a sua implementação pendente. Conclui-se que, apesar de esta poder efetivamente possibilitar um aumento da produtividade por redução do tempo de carregamento da mesa, exigia mais esforço físico por parte dos operadores, principal motivo que inviabilizou a sua aplicação imediata.

Com a calibração do tempo de atuação do empurrador de blocos à saída da retificadora conseguiu-se melhorar a disposição dos blocos retificados na paleta, diminuindo o risco de queda dos mesmos no transporte.

A colocação de um sensor na retificadora para medir a altura dos blocos tem a sua implementação prevista para breve. Esta melhoria será de grande importância uma vez que permitirá eliminar um problema recorrente na máquina, responsável por bastantes tempos improdutivos.

6.2 Perspetivas de Trabalho Futuro

No seguimento do trabalho realizado durante a presente dissertação considera-se que, num futuro próximo, o primeiro passo deve ser assegurar que as melhorias sugeridas e aprovadas são efetivamente implementadas. Para além disso, as normas que acompanham estas melhorias, inerentes ao funcionamento das mesmas, devem ser cumpridas.

Com a análise feita à linha, avaliou-se que o motivo responsável por mais paragens, para além do *setup*, é a ausência do operador. Seria, por isso, útil perceber os motivos de tantas ausências e, caso estes não forem válidos, dever-se-á alertar as chefias para esta realidade.

Seria interessante rever os passos que os operadores necessitam de realizar quando terminam de laminar uma encomenda. Este procedimento, descrito em 3.3.1, é bastante demorado e requer uma série de etapas que poderiam ser evitadas se as declarações de produção e a justificação de paragens passassem a ser informatizadas.

Na retificadora há alguns aspetos que poderão ser melhorados. O aumento da cadência produtiva da máquina seria bastante vantajosa, uma vez que esta é baixa e a retificadora abastece toda a linha e outras linhas, inclusive. Para além disso, sugere-se uma reavaliação da manutenção feita à máquina, de forma a minorar encravamentos e paragens que vão ocorrendo com alguma frequência.

Concluindo, deverá, acima de tudo, haver uma procura pela melhoria contínua, com vista ao aumento da produtividade e redução de desperdícios, para que a empresa seja cada vez mais competitiva no mercado.

Referências

- Baur, Nina, and Siegfried Lamnek. 2007. "Multivariate analysis." *The Blackwell Encyclopedia of Sociology*. Blackwell Publishing Ltd:5176-5179.
- Chatfield, Chris. 1988. Apples, oranges and mean square error. Elsevier.
- Chu, Ching-Wu, Gin-Shuh Liang, and Chien-Tseng Liao. 2008. "Controlling inventory by combining ABC analysis and fuzzy classification." *Computers & Industrial Engineering* 55 (4):841-851.
- Cohen, Jacob, Patricia Cohen, Stephen G West, and Leona S Aiken. 2013. *Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences*: Routledge.
- Goodwin, Paul, and Richard Lawton. 1999. "On the asymmetry of the symmetric MAPE." *International journal of forecasting* 15 (4):405-408.
- Ioannou, George, and Stavrianna Dimitriou. 2012. "Lead time estimation in MRP/ERP for make-to-order manufacturing systems." *International Journal of Production Economics* 139 (2):551-563. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.05.029.
- Kaplan, AC, and AT Unal. 1993. "A probabilistic cost-based due date assignment model for job shops." *The International Journal of Production Research* 31 (12):2817-2834.
- Karmarkar, Uday S. 1993. "Manufacturing lead times, order release and capacity loading." *Handbooks in Operations Research and Management Science* 4:287-329.
- Koch, Richard. 2011. *The 80/20 principle: the secret to achieving more with less*: Crown Business.
- LaerdStatistics. 2015. "Multiple regression using SPSS Statistics". *Statistical tutorials and software guides*. Retrieved from <https://statistics.laerd.com/>.
- Mourtzis, D., M. Doukas, K. Fragou, K. Efthymiou, and V. Matzourou. 2014. "Knowledge-based Estimation of Manufacturing Lead Time for Complex Engineered-to-order Products." *Procedia CIRP* 17:499-504. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.087.
- Ng, Wan Lung. 2007. "A simple classifier for multiple criteria ABC analysis." *European Journal of Operational Research* 177 (1):344-353.
- Nyhuis, Peter, Gregor von Cieminski, Andreas Fischer, and Klaus Feldmann. 2005. "Applying simulation and analytical models for logistic performance prediction." *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 54 (1):417-422.
- Öztürk, Atakan, Sinan Kayahgil, and Nur E. Özdemirel. 2006. "Manufacturing lead time estimation using data mining." *European Journal of Operational Research* 173 (2):683-700. doi: 10.1016/j.ejor.2005.03.015.
- Press, S James. 2012. *Applied multivariate analysis: using Bayesian and frequentist methods of inference*: Courier Corporation.

- Seyedhosseini, Seyed Mohammad, and Ahmad Ebrahimi-Taleghani. 2015. "A stochastic analysis approach on the cost-time profile for selecting the best future state map." *South African Journal of Industrial Engineering* 26 (1):267-291.
- Tatsiopoulos, IP, and BG Kingsman. 1983. "Lead time management." *European Journal of Operational Research* 14 (4):351-358.
- Ziarati, Reza. 2006. "Safety At Sea—Applying Pareto Analysis." Proceedings of World Maritime Technology Conference (WMTC 06), Queen Elizabeth Conference Centre.

ANEXO A: Tabela de Correlações da Regressão Multivariada com 6 Variáveis Independentes

		Correlações											
		Turno_d	Ref	Esp	Densidade	Tam_Grao	MD_d	AD_d	LOTE_d	Lam003_d	Lam007_d	Lam008_d	Lam012_d
Turno_d	Correlação de Pearson	1	-,003	,132	-,231	,090	-,133	-,042	,125	,155	,183	-,245	-,039
	Sig. (bilateral)		,979	,271	,052	,456	,269	,728	,297	,197	,127	,040	,746
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Ref	Correlação de Pearson	-,003	1	,171	-,239	-,572	,521	-,270	-,516	,093	-,062	-,044	,301
	Sig. (bilateral)	,979		,154	,045	,000	,000	,023	,000	,438	,605	,713	,011
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Esp	Correlação de Pearson	,132	,171	1	-,404	,136	-,154	,075	-,119	-,230	,636	-,028	,004
	Sig. (bilateral)	,271	,154		,000	,258	,199	,537	,323	,053	,000	,815	,974
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Densidade	Correlação de Pearson	-,231	-,239	-,404	1	-,147	,289	,281	,038	-,061	-,292	,217	-,054
	Sig. (bilateral)	,052	,045	,000		,222	,015	,017	,753	,611	,013	,069	,652
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Tam_Grao	Correlação de Pearson	,090	-,572	,136	-,147	1	-,658	-,174	,677	-,033	,343	-,217	-,171
	Sig. (bilateral)	,456	,000	,258	,222		,000	,146	,000	,785	,003	,069	,153
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
MD_d	Correlação de Pearson	-,133	,521	-,154	,289	-,658	1	-,160	-,403	,095	-,251	,043	,070
	Sig. (bilateral)	,269	,000	,199	,015	,000		,181	,000	,431	,035	,720	,562
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
AD_d	Correlação de Pearson	-,042	-,270	,075	,281	-,174	-,160	1	-,191	-,142	-,025	,047	-,105
	Sig. (bilateral)	,728	,023	,537	,017	,146	,181		,111	,236	,833	,698	,384
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
LOTE_d	Correlação de Pearson	,125	-,516	-,119	,038	,677	-,403	-,191	1	,158	,317	-,280	-,264
	Sig. (bilateral)	,297	,000	,323	,753	,000	,000	,111		,189	,007	,018	,026
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Lam003_d	Correlação de Pearson	,155	,093	-,230	-,061	-,033	,095	-,142	,158	1	-,290	-,210	-,197
	Sig. (bilateral)	,197	,438	,053	,611	,785	,431	,236	,189		,014	,079	,099
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Lam007_d	Correlação de Pearson	,183	-,062	,636	-,292	,343	-,251	-,025	,317	-,290	1	-,227	-,214
	Sig. (bilateral)	,127	,605	,000	,013	,003	,035	,833	,007	,014		,057	,073
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Lam008_d	Correlação de Pearson	-,245	-,044	-,028	,217	-,217	,043	,047	-,280	-,210	-,227	1	-,154
	Sig. (bilateral)	,040	,713	,815	,069	,069	,720	,698	,018	,079	,057		,199
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
Lam012_d	Correlação de Pearson	-,039	,301	,004	-,054	-,171	,070	-,105	-,264	-,197	-,214	-,154	1
	Sig. (bilateral)	,746	,011	,974	,652	,153	,562	,384	,026	,099	,073	,199	
	N	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71

ANEXO B: Instruções para utilização do Modelo de Previsão do Lead Time de Laminagem

Folha “Dados”:

Nesta folha devem ser colados os dados relativos às encomendas semanais. Os campos a azul são de preenchimento obrigatório, os campos a amarelo são de preenchimento facultativo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		Encomendas da Semana												
2														
3														
4														
5														
6		Encomenda	OF	Código	Descrição	Ref	QTD	Esp	Quant.BL	Posto Trabalho	Temp prod.	DIM	DIM_Desc	ANTE
7		IK 21/17	W711055	45P4150313350	P415/03 950x650x35,0 mm (PEFC)	P415	364,00	35,00	93,53	SERRA	8,67	13	940x635	
8										LIX	3,64		XX	
9		0151902001	W710072	6584050361200CM	8405/03 950x650x20,0 mm	8405	1000,00	20,00	113,39	LIX	5,26	61	950x650	
10		0145893003	W710736	6584050023050SP	8405/00 1000x500x5,0 mm	8405	960,00	5,00	23,33	LAM	1,84	23	1000x500	
11		0151564002	W710107	658003001302020	8003/00 940x640x2,0 mm	8003	378,00	2,00	3,10	LAM	0,49	13	940x635	
12		0151568002	W709274	658002342310001	8002/34 1000x500x10,0 mm	8002	3900,00	10,00	209,49	LIX	15,00	23	1000x500	
13		0151569001	W709276	658002002304003	8002/00 1000x500x4,0 mm	8002	12480,00	4,00	249,70	LAM	21,93	23	1000x500	
14		0151632001	W709297	698455886409500	8455/88 915x610x9,5 mm	8455	192,00	9,50	0,00	LIX	0,36	64	-	
15		0151634001	W709303	658403006406002	8403/00 915x610x6,0 mm	8403	5600,00	6,00	137,12	LAM	12,76	64	915x610	
16		0151718001	W709544	658004001305003	8004/00 940x640x5,0 mm	8004	840,00	5,00	17,32	LAM	1,61	13	940x635	
17		0151751003	W709550	658003001301802	8003/00 940x640x1,8 mm	8003	830,00	1,80	6,16	LAM	0,99	13	940x635	
18		0151756002	W709568	6584050264050BA	8405/02 915x610x5,0 mm	8405	360,00	5,00	7,73	LIX	0,80	64	915x610	
19		0151756003	W709569	6584050264060BA	8405/02 915x610x6,0 mm	8405	100,00	6,00	2,63	LIX	0,22	64	915x610	
20		0151756004	W709570	658405026408005	8405/02 915x610x8,0 mm	8405	80,00	8,00	2,72	LIX	0,23	64	915x610	
21		0151756005	W709571	658405026410010	8405/02 915x610x10,0 mm	8405	120,00	10,00	5,16	LIX	0,34	64	915x610	
		Dados Previsão Previsão Geral Densidades + : <												
PRONTO		100%												

Folha “Previsão”:

Nesta folha é mostrada a previsão feita pelo modelo. Os campos a verde são preenchidos automaticamente recorrendo aos valores da folha “Dados”.

O valor da previsão feita pelo modelo é indicado na primeira coluna a cor-de-laranja (coluna Z). Este valor da previsão é o valor final e já contempla os tempos de *setup* e uma percentagem de paragens de 22,49% (célula AD3).

Nota: Na primeira coluna roxa (coluna AB), é indicada uma previsão tendo em conta o OEE documentado para a linha. Esta previsão é meramente informativa, sendo que a previsão que deve ser considerada como previsão do modelo é a indicada na primeira coluna cor-de-laranja, como já foi referido.

Cálculo do Lead Time													
				Erros:				Média da % de paragens/hora s/ SETUP				T. Setup médio	
								Desv.Pad da % de paragens/hora s/ SETUP				Desv.Pad T. Setup	
								22,49%				00:13:41	
								20,78%				00:02:45	
LAM	Encomenda	Ordem	Ref	Nº Placas	Esp	Comp.	Largura	Altura	Tempo Final com % de	Nº Turnos - com % de paragens	Tempo Final com OEE	Nº Turnos	
1	0145893003	W710736	8405	960	5,00	1000	500	210	1:14:54	0,1742	1:08:18	0,1588	
1	0151564002	W710107	8003	378	2,00	940	640	250	0:24:06	0,0560	0:21:59	0,0511	
1	0151569001	W709276	8002	12480	4,00	1000	500	210	13:47:42	1,9249	12:34:47	1,7553	
1	0151634001	W709303	8403	5600	6,00	915	610	250	9:08:11	1,2749	8:19:54	1,1626	
1	0151718001	W709544	8004	840	5,00	940	640	250	1:16:14	0,1773	1:09:32	0,1617	
1	0151751003	W709550	8003	830	1,80	940	640	250	0:31:47	0,1204	0:47:13	0,1098	
1	0151758001	W709577	8123	750	1,70	1000	500	210	0:40:47	0,0948	0:37:11	0,0865	
1	0151758003	W709578	8004	180	3,00	915	610	250	0:13:17	0,0309	0:12:07	0,0282	
1	0151771001	W709613	8403	4320	2,60	915	610	250	5:03:18	0,7053	4:36:35	0,6432	
1	0151771002	W709614	8403	2700	4,00	915	610	250	3:40:48	0,5135	3:21:21	0,4682	
1	0151771003	W709615	8403	2400	6,00	915	610	250	3:34:56	0,5464	3:34:15	0,4982	
1	0151815001	W709815	8004	100	8,00	915	610	250	0:11:36	0,0270	0:10:35	0,0246	
1	0151815002	W709816	8004	100	10,00	915	610	250	0:13:02	0,0303	0:11:53	0,0277	
1	0151860001	W709985	8003	100	3,00	915	610	250	0:07:11	0,0167	0:06:33	0,0152	
1	0151863001	W709989	8405	384	10,00	915	610	250	0:50:34	0,1176	0:46:07	0,1072	

A coluna AA indica o número de turnos necessários para produzir a encomenda.

A coluna “LAM” (coluna B) indicará o número “1” caso o posto de trabalho onde a encomenda será processada seja uma laminadora e o número “0” caso seja outra máquina. O modelo apenas prevê o tempo de laminagem, sendo que se deve filtrar esta coluna para apenas aparecer os valores “1”.

Erros

Na parte superior da folha encontra-se uma legenda para os erros que podem ocorrer no programa.

Erro 1: A linha é assinalada a vermelho claro quando não existe registo da densidade para a referência introduzida nessa linha.

Erro 2: A linha é assinalada a amarelo quando o programa não reconhece as dimensões introduzidas.

Erro 3: A linha é assinalada a roxo quando não existe outro erro desconhecido.

Folha “Previsão Geral”:

Nesta folha, é possível fazer um cálculo isolado do *lead time*, sem ser necessário introduzir valores na folha “Dados”. Devem introduzir-se os valores nas colunas verdes, destinadas aos *inputs*, e o valor da previsão será indicado na primeira coluna cor-de-laranja (coluna T).

	A	B	C	D	E	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	A
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
11																	
12																	
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	

Folha “Densidades”:

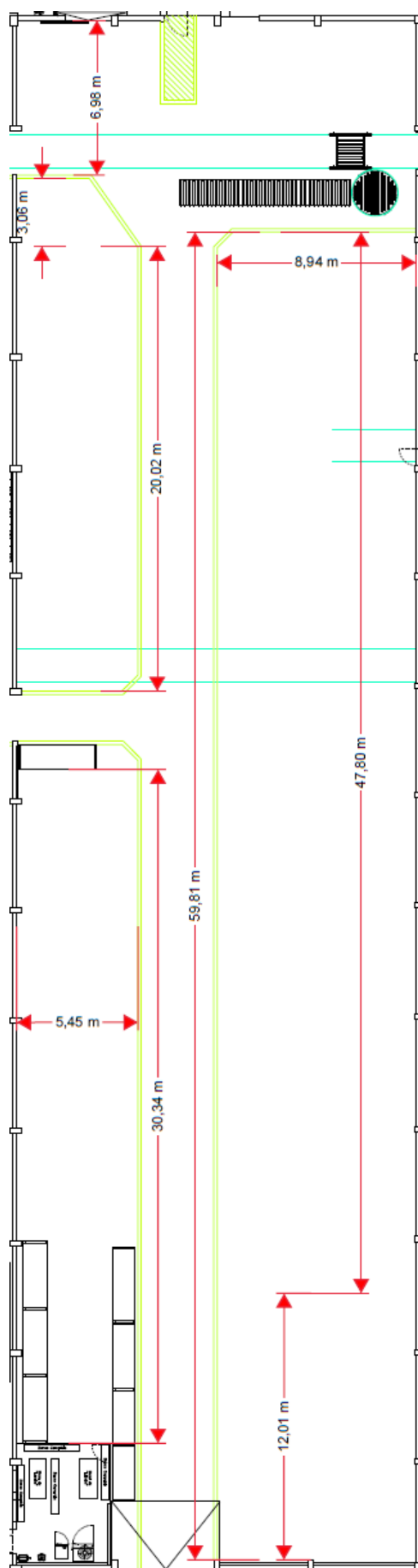
Esta folha contém o registo dos valores das densidades para cada referência. Caso a densidade de uma certa referência não esteja na base de dados, é só adicionar o valor nesta tabela.

Refs	Densidades [Kg/m³]
8002	159
8003	198
8004	232
8006	203
8026	219
8057	280
8109	363
8122	433
8123	277
8303	248
8304	150
8350	259
8400	255
8402	300
8403	227
8404	180
8405	255
8455	388
8512	288
8702	330

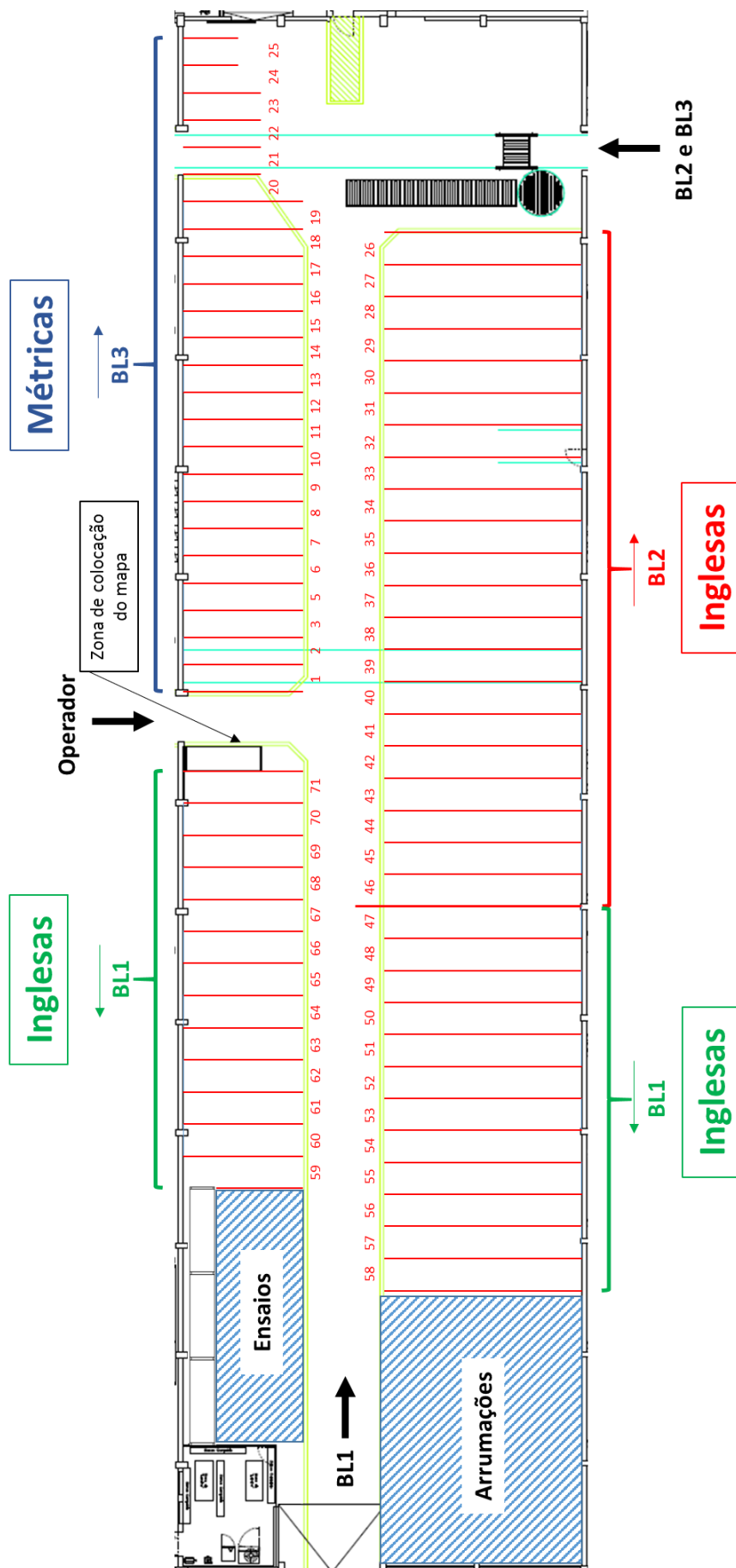
Notas Importantes:

Nota 1: Na folha “Previsão”, as colunas K à Y estão ocultas. Estas colunas contêm cálculos intermédios para obtenção do valor final da previsão. Caso se pretenda ver estes cálculos ou fazer alguma alteração estas colunas podem ser colocadas visíveis.

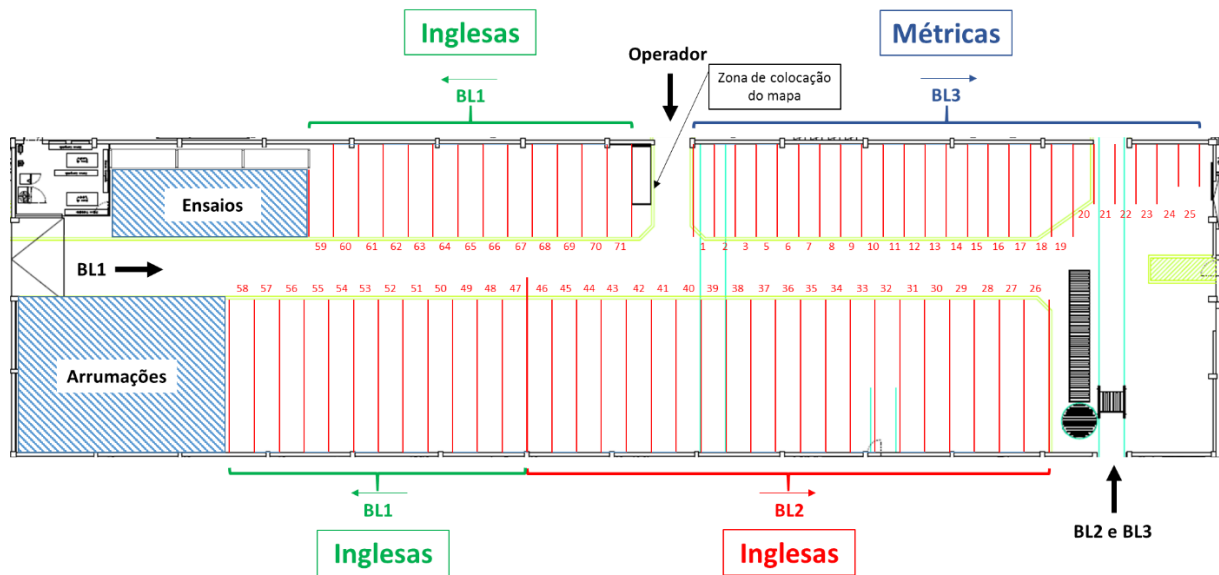
ANEXO C: Planta do Armazém de Blocos e Respetivas Dimensões



ANEXO D: *Layout* Proposto para o Armazém de Blocos



ANEXO E: Normas do Novo *Layout* do Armazém de Blocos



1. Os blocos, dependendo se vêm do BL1, BL2 ou BL3, devem ser colocados na zona correspondente, conforme indicado na figura.
2. As setas junto às indicações do BL1, BL2 ou BL3 indicam o sentido em que as referências devem ser colocadas, tendo em conta a sua rotatividade. Por outras palavras, as setas apontam da referência com mais rotação para a referência com menos rotação, em cada zona. O operador que traz os blocos deve seguir, sempre que possível, o sentido indicado pelas setas ao colocar referências.
3. O operador que traz os blocos deve verificar se a referência que traz já se encontra em alguma viela que ainda não esteja completa. Caso isto se verifique, ele apenas tem de colocar os blocos na viela correspondente. Caso isto não se verifique deve proceder da seguinte forma:
 - a. Se a referência já existe mas a viela está completa: O operador deve colocar os blocos na viela livre ao lado da viela completa. Caso não haja nenhuma viela livre adjacente, deve colocar na viela livre mais próxima.
 - b. Se a referência não existe: O operador deve seguir o procedimento descrito em 2.
4. Após colocar os blocos na viela que estava vazia, o operador deve deslocar-se até ao mapa e assinalar a referência que colocou, no sítio correspondente. Deve escrever com o marcador o número da referência na vertical e na zona inferior, a indicação “m” e “i”, dependendo se trata de uma dimensão métrica ou inglesa, respetivamente.

Notas Importantes:

Nota 1: Apesar de se achar que este é o método mais prático, em alternativa à escrita com marcador, poderão usar-se cartões magnéticos como o da figura seguinte:



Nota 2: As zonas destinadas aos blocos vindos do BL1 e do BL2 são flexíveis, sendo que o número de vias para cada uma das linhas pode variar em função das necessidades do momento.

Nota 3: As zonas destinadas às dimensões métricas e inglesas devem ser cumpridas. A única situação excecional será se toda a zona das referências métricas estiver preenchida, nesse caso poderá colocar-se excecionalmente as referências métricas a mais na zona das inglesas. Logo que haja disponibilidade na zona das dimensões métricas, estas referências devem ser trocadas para esse local.

Nota 4: É de extrema importância cumprir as normas acima para que o sistema funcione e se consiga melhorar a organização do armazém.